

**UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR**  
**ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE**  
**L'ENVIRONNEMENT**  
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES**

**Année: 2019**

**N° d'ordre: 05**



**THESE UNIQUE DE DOCTORAT**

Spécialité : Entomologie

Présentée par:

**M<sup>elle</sup> Mame Fatoumata GOUDIABY**

**DIVERSITE DES INSECTES RAVAGEURS DU MIL ET**  
**LEUR REGULATION BIOLOGIQUE AU NIVEAU DU**  
**BASSIN ARACHIDIER DU SENEGAL**



**Soutenu le 08 mai 2019 devant le jury composé de :**

Président :	M. Mady Ndiaye	Professeur titulaire, FST/UCAD, Dakar
Rapporteurs :	M. Malick Niango Ba	Maître de recherches, ICRISAT, Niger
	M. Saliou Ndiaye	Professeur titulaire, ENSA / UT, Thiès
	M. Saliou Ngom	Maître de recherches, CDH/ISRA, Dakar
Examineurs :	M. Mamour Toure	Maître de conférences assimilé, SEF/UGB, St-Louis
	M. Cheikh Thiaw	Maître de conférences titulaire, USSEIN, Kaolack
	M. Ibrahima Sarr	Chargé de recherches, CNRA/ISRA, Bambey
Directeur de Thèse :	M. Mbacké SEMBENE	Professeur titulaire, FST/UCAD, Dakar

## DEDICACES

*A mes très chers parents, **Sérigne Touba Goudiaby** et **Yama Ndiaye** qui ont toujours cru en moi, m'ont soutenue et accompagnée par leurs prières.*

*A ma famille, pour leur assistance et à tous ceux qui me sont chers.*

## REMERCIEMENTS

Les travaux de cette thèse ont été menés au laboratoire d'Entomologie du Centre National de la Recherche Agronomique de Bambey (ISRA-CNRA Bambey) dans le cadre du Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO) financé par la banque mondiale et du programme Sorghum and Millet Innovation Lab. (SMIL) financé par l'USAID à travers le Feed the Future Innovation Laboratory.

Après avoir rendu, grâce à Dieu, Allah (SWT) de m'avoir permis d'achever cette thèse, je prie pour que la paix et le Salut soient sur notre cher prophète Muhamad Rassulilah (SAW).

Je suis spécialement reconnaissante au professeur Mbacké Sembène pour avoir accepté de diriger cette thèse. Merci de nous avoir soutenus tout au long de notre formation de Master puis de Doctorat. Vous m'avez incitée à aller au-delà de mes limites et à révéler mes capacités.

Je suis redevable à mon superviseur du CNRA de Bambey, Dr Ibrahima Sarr pour les moyens qu'il a su mettre à notre disposition pour que cette thèse se déroule du mieux possible, mais aussi d'avoir été à la fois un professeur, un ami et un frère. Dr Sarr, vous avez toujours cru en mes capacités et m'avez toujours poussée à aller au-delà de mes réserves. Vous m'avez appris ce qu'est l'amour du travail, l'éthique et l'humilité dans la profession. Vous m'avez également poussée à croire en moi et à en vouloir toujours davantage. Tous ces acquis y compris vos commentaires, critiques, et suggestions tout au long de mon Master et de cette thèse sont pour moi inestimables.

Mes sincères remerciements à Dr Aliou Diongue et Mme Absa Ndiaye Guèye. Tout a commencé grâce à vous et vous n'avez pas cessé de croire en moi. Malgré vos nombreuses obligations, vous ne manquez de vous enquérir de l'état d'avancement de ma carrière.

Mes remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail notamment au président du jury, Professeur Mady Ndiaye, aux rapporteurs, Dr Malick Niango Bâ, Professeur Saliou Ndiaye et Dr Saliou Ngom ainsi qu'aux examinateurs Dr Mamour Touré et Dr Cheikh Thiaw.

À tout le personnel du CNRA de Bambey. Mention spéciale à Dr Galbert Séraphin Dorégo pour sa disponibilité et sa formation aux SIG et à Ta Rosalie Diouf pour son assistance et sa patience lors de mes recherches documentaires.

A mes collègues doctorants de l'ISRA : Fatou Wéllé, Adja Néné Thiam, Cyril Diatta, Ghislain Kanfany, Ange Zoclanclounon, Richard Diémé, Fatou Tine et Moussa Diangar, pour leur appui.

Je remercie également Boubacar Baldé, Baba Fall, Tamsir Mané et El hadji Malick Ndiaye pour leur assistance technique lors de mes travaux de terrain et de laboratoire.

Mention spéciale à Dr Baba Ngom, ami et collègue pour avoir toujours été là pour moi et pour les fructueuses idées dont il m'a gratifiées.

Ma profonde reconnaissance à mes sœurs, amies et collègues doctorantes Ngoné Diop, Mireille Bassène, Aïssatou Ivette Diallo et Khoudia Diop. Qu'Allah renforce nos liens et nous assiste pour la suite du voyage.

Ma profonde gratitude à ma famille : mes parents, frères et sœurs, pour m'avoir toujours soutenue et avoir significativement contribué à ma réussite par leurs prières et encouragements.

A ma très chère famille du CNRA de Bambey : Benjamin Badji, Cheikh Aba Diéme, Gnilane, Séne, Malick Sall, Amy Tendeng, Mariétou Ly, Mboré Niang, Hamidou Diallo et Romuel Badji.

A ma famille de Nioro spécialement à Mme Fall, Diélé Guèye pour m'avoir accueillie comme un membre de la famille. Votre bonté est pour moi inestimable.

A mes très chers amis: Aminata Violette Thiam, Nassir Sarr et Omar Thiaw. Merci d'avoir toujours été à mes côtés.

A M. Mbaye Mbow pour la relecture du document de thèse, ses suggestions ainsi que son assistance.

A tous ceux que je n'ai pas pu citer ici et qui m'ont soutenue de près ou de loin.

## RESUME

Le mil (*Pennisetum glaucum*), est une importante céréale au Sénégal où il est développé par les petits producteurs essentiellement pour leur autoconsommation. Toutefois, les rendements en milieu paysan sont faibles (500-800kg/ha) à cause de nombreux facteurs y compris les dégâts d'insectes ravageurs. Pour aborder ce problème et contribuer à l'amélioration de la production du mil, ce travail de thèse a été entrepris principalement pour: caractériser la diversité et l'abondance des insectes en général dans l'agro-écosystème du mil; déterminer la distribution, l'incidence et les dégâts des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi ainsi que le niveau de leur parasitisme naturel et l'impact des pratiques culturales; évaluer la régulation des foreurs de tige et de la mineuse de l'épi par la plante de mil et par le lâcher augmentatif de parasitoïdes larvaires. Cette thèse a été conduite pendant 4 saisons (2013 - 2016) dans le centre sud du bassin arachidier du Sénégal. L'abondance et la diversité des insectes dans l'agroécosystème du mil ont été caractérisées pendant la saison culturale de 2016. Globalement, il est ressorti une grande diversité d'insectes avec 92 espèces réparties dans 32 familles et 7 ordres. Différentes communautés d'insectes ont été rencontrées y compris les ravageurs et ennemis naturels avec une certaine variabilité où les ravageurs étaient plus abondants. Parmi les ravageurs, *Mylabris pallipes*, *Spodoptera exempta* et *Kraussaria angulifera* ont été rencontrés avec la plus grande fréquence. Pour les ennemis naturels, une trentaine d'espèces de parasitoïdes et de prédateurs ont été rencontrés. Par ailleurs, les insectes ravageurs et les ennemis naturels ont été rencontrés principalement entre les stades végétatifs et de remplissage des grains de mil. Par rapport aux foreurs de tiges et la mineuse *H. albipunctella*, leur impact sur le mil ainsi que le niveau de leur parasitisme naturel ont été étudiés au cours des saisons culturales de 2013 et 2014. Généralement, ces insectes ont présenté une distribution spatiale principalement agrégative dans les parcelles. Pour les foreurs de tiges, l'incidence, la densité et le parasitisme des larves ont été variables selon les saisons et relativement faibles. Les principales espèces responsables des dégâts étaient *Sesamia calamistis* (87% - 99%), *Coniesta ignefusalis* (12%), *Eldana saccharina* (1%) et *Busseola fusca* (1%). *S. calamistis* a été parasité par *Bracon brevicornis* (8% - 16%) alors que *C. ignefusalis* a été attaqué par *Stenobracon rufus* (3%), *Psilochalsis soudanensis* (<1%) et *Sturmiopsis parasitica* (3%). Quant à *H. albipunctella*, l'incidence a été assez élevée tandis que la densité des larves et les pertes en grain estimées ont été faibles. Le parasitisme des larves a été relativement faible et essentiellement causé par *Bracon hebetor*. Aussi, une variabilité de ces paramètres a été notée selon les saisons. En outre, les pratiques culturales telles que le travail du sol, la rotation culturale et la date de semis ont des effets variables sur l'incidence, la densité des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi mais également sur les pertes en grains. La régulation des foreurs de tiges et de

*H. albipunctella* a été évaluée sur différentes variétés de mil pendant les hivernages de 2014 et 2015. Les variétés Thalack2 et Gawane ont enregistré moins de dégâts des foreurs de tiges tandis que la variété ISMI9507 a eu moins de dégâts dus à *H. albipunctella*. Bien qu'ayant été fortement infestées par *H. albipunctella*, la variété Thalack2 a enregistré le rendement en grain le plus élevé. Dans le cas particulier de *H. albipunctella*, le renforcement de la régulation par les lâchers augmentatifs de *B. hebetor* en milieu paysan a été effectué en fonction de la phénologie du mil et de l'émergence des adultes pendant la saison culturale de 2016. Une augmentation significative du parasitisme des larves (jusqu'à 70%) et une réduction des dégâts ont été notés lorsque les lâchers de *B. hebetor* étaient effectués 45 jours après les premières vols de *H. albipunctella* et pendant le stade de remplissage des grains de mil.

**Mots clés :** Mil, *Heliocheilus albipunctella*, foreurs de tiges, régulation biologique, *Bracon hebetor*.

### ABSTRACT

Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), is a staple food cereal crop in Senegal where it is grown by smallholder farmers for their own consumption. However, yields remains lower (500-800kg/ha) in farmer field and attributed to many constraints including insect pests. To deal with this problem and contribute to the improvement of millet production, this thesis has been undertaken mainly to: characterize insect pests abundance and diversity in pearl millet agroecosystem; determine the distribution, incidence and damage of stem borers and the millet headminer, *H. albipunctella* as well as their natural parasitism and the effect of cultural practices; assess the biological regulation of those pests by the millet host and the augmentative release of larval parasitoids. The experimentations were conducted during 4 season (2013-2016) in the Senegalese peanut basin. The abundance and diversity of insects in pearl millet agroecosystem were studied in 2016 cropping season. Overall, 92 insect species belonging to 32 families and 7 order were identified. Different insect communities have been recorded including pests and natural enemies with variable number of individuals and species. The insect pests were most abundant and diverse with *Mylabris pallipes*, *Spodoptera exempta* and *Kraussaria angulifera* which were more frequent in pearl millet fields. For the natural enemies, about thirty species of parasitoids and predators commonly associated with insect pests were recorded. In addition, insect pests and natural enemies were recorded in millet agrosystem mainly between the vegetative and grain filling stages. For the stem borers and *H. albipunctella*, their impact on millet and natural parasitism level were investigated in 2013 and 2014 cropping season. Overall, insects showed mainly an aggregated distribution pattern in the field. Stem borers incidence, density and parasitism of larvae

were lower and variable according to seasons. Stem borers species recovered from pearl millet stalks were *Sesamia calamistis* (87%-99%), *Coniesta ignefusalis* (12%), *Eldana saccharina* (1%) and *Busseola fusca* (1%). *S. calamistis* were parasitized by *Bracon brevicornis* (8% - 16%) while the parasitism of *C. ignefusalis* were due to *Stenobracon rufus* (3%), *Psilochalsis soudanensis* (<1%) and *Sturmiopsis parasitica* (3%). As for *H. albipunctella*, the incidence were high enough compared to the density of larvae and estimated grain losses. The larval parasitism were also relatively low and due to *Bracon hebetor*. Also, for this insect, evaluated parameters were variable according to seasons. Besides, cultural practices such as soil management, rotation and time of sowing showed variable effects on the incidence, densities of larvae and estimated grain losses. The regulation of stem borers and *H. albipunctella* by the cultivated pearl millet were evaluated in different varieties during 2014 and 2015 raining season. The varieties Thalack2 and Gawane recorded less stem borers damages while the lower *H. albipunctella* damages has been recorded from ISMI9507. Despite the high damages of *H. albipunctella* on Thialack2, the variety recorded a higher grain yield. The regulation of *H. albipunctella* by the augmentative release of *B. hebetor* in farmer field has been done according to the millet phenology and the first flight of the pest in 2016 cropping season. An increase in parasitism up to 70% and a reduction in damages were recorded after release 45 days after the first flight of *H. albipunctella* adults and during the filling stage of millet.

**Keywords:** Pearl millet, *Heliocheilus albipunctella*, stem borers, biological regulation, *Bracon hebetor*

## TABLES DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
TABLES DES MATIERES	vii
SIGLES ET ABBREVIATIONS	xi
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xii
INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE	1
<b>CHAPITRE 1 Synthèse Bibliographique</b>	<b>5</b>
1.1. Généralités sur le mil	5
1.1.1. Origine et systématique	5
1.1.2. Exigences éco-climatiques	5
1.1.3. Phénologie	6
1.1.3.1. Phase végétative	6
1.1.3.2. Phase de reproduction	6
1.1.3.3. Groupes de mils cultivés	7
1.1.4. Importance et utilisation	7
1.2. Principales contraintes biotiques du mil	8
1.2.1. Mauvaises herbes et maladies	8
1.2.2. Insectes ravageurs	9
1.2.2.1. Foreurs de tiges	10
1.2.2.1.1. Importance et distribution	10
1.2.2.1.2. Biologie des foreurs de tiges	10
1.2.2.1.3. Dégâts et pertes de production	13
1.2.2.2. Insectes de l'épi	13
1.2.2.2.1. Mineuse de l'épi du mil	14
1.2.2.2.1.1. Bio-écologie	14
1.2.2.2.1.2. Dégâts et pertes de production	16
1.2.2.3. Autres insectes	17
1.2.3. Méthodes de lutte contre les principaux insectes ravageurs du mil	18
1.2.3.1. Lutte culturale	18
1.2.3.2. Lutte chimique	19
1.2.3.3. Résistance variétale	20
1.2.3.4. Lutte biologique	21
<b>CHAPITRE 2 Caractéristiques de l'Environnement du Bassin Arachidier</b>	<b>24</b>
2.1. Présentation du bassin arachidier	24
2.2. Caractéristiques climatiques	25

2.2.1.	Pluviométrie	25
2.2.2.	Température et humidité relative	25
2.2.3.	Vents	27
2.3.	Caractéristiques de l'agriculture	27
<b>CHAPITRE 3 Abondance et Diversité des Insectes dans l'Agro-écosystème du Mil du Bassin Arachidier</b>		<b>28</b>
	Introduction	28
3.1.	Matériels et méthodes	29
3.1.1.	Choix des parcelles	29
3.1.2.	Piégeage et collecte des insectes	31
3.1.3.	Identifications des insectes	32
3.1.4.	Estimation des variables	33
3.1.4.1.	Calcul de la diversité des insectes	33
3.1.4.2.	Calcul de la fréquence relative des insectes	33
3.1.4.3.	Analyse des données	34
3.2.	Résultats	34
3.2.1.	Abondance et diversité des communautés d'insectes	34
3.2.2.	Abondance et fréquence relative des différentes sous-communautés d'insectes	35
3.2.3.	Densité des espèces dans les différentes sous-communautés d'insectes ravageurs	36
3.2.4.	Fréquence des principaux insectes ravageurs	38
3.2.5.	Densité des espèces dans les différentes sous-communautés d'ennemis naturels	40
3.2.6.	Dynamique de population des principaux insectes ravageurs en fonction des stades phénologiques du mil	41
3.2.7.	Dynamique de population des ennemis naturels en fonction des stades phénologiques du mil	43
3.3.	Discussion	44
	Conclusion	47
<b>CHAPITRE 4 Impact de la Mineuse de l'Epi et des Foreurs de Tiges sur le Mil et Importance de leur Régulation par les Parasitoïdes dans le Bassin Arachidier</b>		<b>49</b>
	Introduction	49
4.1.	Matériels et méthodes	50
4.1.1.	Choix des parcelles	50
4.1.2.	Echantillonnage des insectes	52
4.1.2.1.	Echantillonnage des foreurs de tiges	52
4.1.2.2.	Echantillonnage de la mineuse de l'épi	52
4.1.2.3.	Pertes de rendement	52
4.1.3.	Identification des insectes	52

4.1.4.	Estimation des variables	53
4.1.4.1.	Distribution spatiale des insectes	53
4.1.4.2.	Incidence des insectes	53
4.1.4.3.	Parasitisme des insectes	54
4.1.4.4.	Pertes de rendement en grains	54
4.1.5.	Enquête agronomique	54
4.1.6.	Analyse des données	54
4.2.	Résultats	55
4.2.1.	Distribution spatiale des larves de foreurs de tiges	55
4.2.2.	Incidence des larves de foreurs de tiges	55
4.2.3.	Densité des larves de foreurs de tiges	57
4.2.4.	Composition et importance relative des espèces de foreurs de tiges du mil	57
4.2.5.	Parasitisme des larves de foreurs de tiges	58
4.2.6.	Importance relative des parasitoïdes des larves de foreurs de tiges	59
4.2.7.	Distribution spatiale des larves de la mineuse de l'épi	60
4.2.8.	Incidence des larves de la mineuse de l'épi	60
4.2.9.	Densité des larves de la mineuse de l'épi	62
4.2.10.	Parasitisme des larves de la mineuse	63
4.2.11.	Pertes en grains	64
4.2.12.	Pratiques culturales des producteurs	65
4.2.13.	Effet des pratiques culturales sur l'incidence et la densité des larves de foreurs de tiges	66
4.2.14.	Effet des pratiques culturales sur l'incidence et la densité des larves de la mineuse de l'épi	67
4.2.15.	Effet des pratiques culturales sur les pertes de rendement en grains estimées	68
4.3.	Discussions	68
	Conclusion	73
<b>CHAPITRE 5 Evaluation de la Résistance des Variétés de Mil aux aux Foreurs de Tiges et à la Mineuse de l'Epi</b>		<b>74</b>
	Introduction	74
5.1.	Matériels et méthodes	74
5.1.1.	Site expérimental	74
5.1.2.	Matériel végétal	75
5.1.3.	Dispositif expérimental	75
5.1.4.	Pratiques culturales	75
5.1.5.	Echantillonnage et paramètres observés	75
5.1.6.	Estimation des variables	76
5.1.6.1.	Incidence des insectes	76
5.1.6.2.	Pertes de rendement en grain	76
5.1.7.	Analyse des données	76
5.2.	Résultats	77
5.2.1.	Incidence des foreurs de tiges	77

5.2.2.	Densité des larves et dégâts des foreurs de tiges	77
5.2.3.	Composition des foreurs de tiges	78
5.2.4.	Incidence de la mineuse de l'épi	79
5.2.5.	Densité des larves et dégâts de la mineuse de l'épi	80
5.2.6.	Rendement et perte en grains	81
5.3.	Discussion	82
	Conclusion	84
<b>CHAPITRE 6</b>	<b>Identification de la Période Optimale de Lâchers Augmentatifs de <i>Bracon hebetor</i> pour la Lutte Biologique contre la Mineuse de l'Epi du Mil</b>	<b>85</b>
	Introduction	85
6.1.	Matériels et méthodes	86
6.1.1.	Site et choix des parcelles	86
6.1.2.	Elevage des insectes	88
6.1.2.1.	Elevage <i>Ephestia kuehniella</i>	88
6.1.2.2.	Elevage <i>Bracon hebetor</i>	88
6.1.3.	Suivi des adultes de la mineuse de l'épi	88
6.1.4.	Lâcher de parasitoïdes au champ	88
6.1.5.	Evaluation des paramètres	89
6.1.5.1.	Echantillonnage de la mineuse de l'épi	89
6.1.5.2.	Estimation de l'incidence	89
6.1.5.3.	Estimation du parasitisme des larves	89
6.1.6.	Analyse des données	90
6.2.	Résultats	90
6.2.1.	Dynamique des populations de la mineuse de l'épi	90
6.2.2.	Incidence et parasitisme des larves dans le bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil	91
6.2.3.	Dégâts dans le bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil	91
6.2.4.	Incidence et parasitisme de la mineuse de l'épi dans le bloc de lâcher en fonction des stades de développement du mil	92
6.2.5.	Dégâts de la mineuse de l'épi dans le bloc de lâcher en fonction des stades de développement du mil	93
6.3.	Discussion	94
	Conclusion	96
CONCLUSION GENERALE		97
PERSPECTIVES		99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		101
ANNEXE 1 .		I
ANNEXE 2:		V
ANNEXE 3:		VI

## SIGLES ET ABBREVIATIONS

ANOVA: Analysis Of Variance

ANSD: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

BCR: Bloc Complet Randomisé

CABI: Centre for Agriculture and Bioscience International

CILSS: Comité Inter-Etat pour la Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CIMMYT: International Maize and Wheat Improvement Centre

CIRAD: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CNRA: Centre National de Recherche Agronomique

CORAF: Conseil Ouest et Centre africain pour la recherche et le développement agricoles

CSE: Centre de Suivi Ecologique

CTA: Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation

DPV: Direction de la Protection des Végétaux

DTGC: Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques

FAO: Food and Agriculture Organization

FAOSTAT: FAO Statistical databases

GLM: General Linear Model

ICRISAT: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

ISRA: Institut Sénégalaise de la Recherche Agricole

JAE: Jour Après Emergence

JAPU: Jour après la 1ère Pluie Utile

JAS: Jour Après Semis

MAER: Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement Rural

ORSTOM: Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer

PPAAO: Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest

ROCAFREMI: Réseau Ouest et Centre Africain de Recherche sur le Mil

SAS: Statistical Analysis System

SIG: Système d'Information Géographique

SMIL: Sorghum and Millet Innovation Laboratory

SNK: Student Newman Keuls

UCAD: Université Cheikh Anta Diop de Dakar

USAID: United State Agency for International Development

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS: World Geodetic System

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Pluviométrie, température et humidité relative enregistrées pendant les hivernages de 2012 à 2016 au centre Sud du bassin arachidier	26
Tableau 2: Abondance et indices de diversité des communautés d'insectes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	34
Tableau 3: Effet de la saison culturale sur l'incidence, la densité et le parasitisme des larves de foreurs de tiges dans le centre sud du bassin arachidier.	56
Tableau 4: Composition et distribution des parasitoïdes des larves de foreurs de tiges au cours des saisons culturales de 2013 et 2014	60
Tableau 5: Effet de la saison culturale sur l'incidence, la densité et le parasitisme des larves de la mineuse de l'épi dans le centre sud du bassin arachidier.	62
Tableau 6: Paramètres de rendement et pertes sur les différentes variétés au cours des hivernages de 2014 et 2015	82

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: <i>Coniesta ignefusalis</i> a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.	11
Figure 2: <i>Sesamia calamistis</i> a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.	12
Figure 3: <i>Busseola fusca</i> a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.	12
Figure 4: <i>Eldana saccharina</i> a) Larve âgée b) Adulte.	13
Figure 5: Symptômes des attaques précoces de foreurs sur le mil ou "cœur mort".	13
Figure 6: Femelle de <i>H. albipunctella</i> en oviposition sur un épi de mil en floraison mâle.	15
Figure 7: Œufs de <i>H. albipunctella</i> sur épi de mil	16
Figure 8: Larves de <i>H. albipunctella</i> dans des galeries, a) stade L2 et b) stade L4.	17
Figure 9: Galeries caractéristiques de la progression des dégâts sur l'épi de mil.	17
Figure 10: Femelle de <i>B. hebetor</i>	22
Figure 11: Larve de <i>H. albipunctella</i> parasitée par <i>B. hebetor</i>	22
Figure 12: Dépouille d'une larve de <i>H. albipunctella</i> avec des cocons de <i>B. hebetor</i>	23
Figure 13: Carte de localisation du bassin arachidier du Sénégal	24
Figure 14. Carte de localisation des parcelles expérimentales de mil dans le centre sud du arachidier.	30
Figure 15: Equipements a) filet fauchoir, b) piège enterré, c) piège à colle jaune, d) piège malais utilisés pour l'échantillonnage des insectes dans les parcelles de mil.	32
Figure 16: A) abondance et B) fréquence de distribution des différentes sous-communautés d'insectes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	35
Figure 17: Densité moyenne ( $\pm$ écart-type) des différentes espèces de A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	37
Figure 18: Fréquence de distribution des principaux A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	39
Figure 19: Densité moyenne ( $\pm$ écart-type) des différentes espèces de A) prédateurs et B) parasitoïdes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	40
Figure 20: Dynamique de population des principaux A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs en fonction de la phénologie du mil au centre sud du bassin arachidier.	42

Figure 21: Dynamique de population des A) parasitoïdes et B) prédateurs associés aux principaux insectes ravageurs en fonction de la phénologie du mil au centre sud du bassin arachidier.	43
Figure 22: Carte de localisation des parcelles de mil échantillonnées au centre sud du bassin arachidier	51
Figure 23: Distribution spatiale des larves de foreurs de tiges dans les parcelles de mil suivies au centre sud du bassin arachidier.	55
Figure 24: Carte de distribution de l'incidence des foreurs de tiges au cours les saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.	56
Figure 25: Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves de foreurs par tige dans les parcelles de mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.	57
Figure 26: Composition et importance relative des foreurs de tiges au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014.	58
Figure 27: Carte de distribution du parasitisme des larves de foreurs de tiges du mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.	59
Figure 28: Distribution spatiale des larves de la mineuse de l'épi dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	60
Figure 29: Carte de distribution de l'incidence de la mineuse de l'épi du mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier	61
Figure 30: Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) des larves de la mineuse par épi dans les parcelles de mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier	62
Figure 31: Carte de distribution du parasitisme des larves de la mineuse de l'épi du mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.	64
Figure 32: Carte de distribution des pertes en grains estimées au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.	65
Figure 33: Proportion (%) des pratiques culturales effectuées par les producteurs de mil en A) 2013 et B) 2014 au centre sud du bassin arachidier.	66
Figure 34: Incidence et nombre de larves des foreurs de tiges en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	67
Figure 35: Incidence et nombre de larves de la mineuse de l'épi en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	67
Figure 36: Pertes de rendement en grain en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.	68
Figure 37: Incidence moyenne ( $\pm$ écart-type) des foreurs de tiges sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de 2014 et 2015.	77
Figure 38: Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves et de trous de foreurs de tiges et pourcentage moyen ( $\pm$ écart-type) de cœurs morts sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015.	78
Figure 39: Composition des insectes foreurs de tiges interceptés sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015.	79
Figure 40: Incidence moyenne ( $\pm$ écart-type) de la mineuse de l'épi sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de 2014 et 2015.	80

- Figure 41: Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves de la mineuse et de galeries et longueur moyenne ( $\pm$ écart-type) des galeries sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015. 81
- Figure 42: Carte de localisation des parcelles témoins et de lâchers de *B. hebetor* dans le Sud bassin arachidier. 87
- Figure 43: Dynamique saisonnière de la mineuse de l'épi dans le centre sud du bassin arachidier. 90
- Figure 44: Incidence et niveau de parasitisme moyen ( $\pm$ écart-type) des larves dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil aux pièges lumineux. 91
- Figure 45: Nombre et longueur moyen ( $\pm$ écart-type) des galeries dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil aux pièges lumineux. 92
- Figure 46: Incidence et niveau de parasitisme moyen ( $\pm$ écart-type) des larves de la mineuse de l'épi dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction du cycle de développement du mil. 93
- Figure 47: Nombre et longueur moyen ( $\pm$ écart-type) des galeries dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction du cycle de développement du mil. 94

## INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), graminée de la famille des poacées, est la sixième céréale la plus importante à l'échelle mondiale après le blé, le riz, le maïs, l'orge et le sorgho. Il sert de nourriture à plus de 100 millions de personnes à travers le monde (Reddy, 2017). Près de 48% de la production mondiale de mil estimée à 13 millions de tonnes provient de l'Afrique, dont les 10,4 millions de tonnes sont attribuées à l'Afrique de l'ouest (FAOSTAT, 2017).

Au Sénégal, en termes de superficies, le mil est la culture la plus importante avec des emblavures moyennes annuelles estimées à 800 000 hectares. Il occupe la première place parmi les céréales pluviales représentant ainsi plus de 40 % de la production nationale estimée à environ 600 000 tonnes/an au cours des cinq dernières années (ANSD, 2016). La zone de production principale du mil est le bassin arachidier où il est cultivé par les petits producteurs, généralement en rotation avec l'arachide (ANSD, 2016; Khouma *et al.*, 2017). Il est essentiellement utilisé dans l'alimentation humaine et animale. Le mil est également une plante rustique capable de se développer sur des sols peu fertiles, en conditions de sécheresse extrême et de température élevée. Sa productivité en conditions de stress et sa courte durée de développement le rendent tout particulièrement intéressant (Nwanze and Harris, 1992; Jukanti *et al.*, 2016; Reddy, 2017). En outre, il comporte d'importants éléments nutritifs y compris les protéines, les fibres, le calcium, le phosphore voire le fer et le zinc (Amadou *et al.*, 2013; Jukanti *et al.*, 2016; Ratnavathi, 2017; Jeeterwal *et al.*, 2018).

En dépit de cette importance, les rendements du mil sont généralement faibles avec des moyennes annuelles nationales variant entre 500 et 800 kg/ha (ANSD, 2016; FAOSTAT, 2017) comparativement au potentiel de 2 à 3 t/ha des variétés améliorées (MAER, 2012).

Les contraintes majeures à la production du mil sont essentiellement liées à la pauvreté des sols, à la pluviométrie erratique, au striga (*Striga hermontica* (Del.) Benth.), aux maladies cryptogamiques comme le mildiou (*Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schroet.), le charbon (*Tolyposporium penicillariae* Bref.), l'ergot (*Claviceps fusiformis* (Wallr.) Tul.) ainsi que les insectes ravageurs (Nwanze et Harris, 1992; Reynolds *et al.*, 2015; Kalaisekar et Padmaja, 2017). Parmi les insectes ravageurs, les foreurs de tiges, principalement *Coniesta* (syn *Acigona*) *ignefusalis* Hampson (Lepidoptera: Noctuidae) et la mineuse de l'épi du mil, *Heliocheilus* (syn *Raghava*) *albipunctella* De Joannis (Lepidoptera: Noctuidae) sont devenus les espèces les plus redoutables pour le mil après la sécheresse des années 70, avec l'élimination de leurs ennemis naturels à cause des traitements antiacridiens (Nwanze, 1991; Harris, 1995; Abate *et al.*, 2000). Ils peuvent occasionner des pertes jusqu'à 100% sur la culture du mil (Youm et Owusu, 1998; Kfir *et al.*, 2002; Drame-Yaye *et al.*, 2003).

Pour faire face à ces ravageurs, plusieurs méthodes sont généralement utilisées notamment la lutte chimique, culturale, biologique et la résistance variétale (Gahukar, 1990b; Youm *et al.*, 1996; Sarr, 1998; Chinwada, 2002; Payne *et al.*, 2011). Cependant, l'intégration de toutes ces méthodes ou gestion intégrée constitue l'une des meilleures approches pour réduire les dégâts dus aux ravageurs des cultures (Nwanze, 1997; Nwilene *et al.*, 2013). Il s'agit de combinaison de méthodes et stratégies appropriées, efficaces avec de moindres effets négatifs sur la santé humaine, animale et environnementale (Gray *et al.*, 2009). Favoriser la régulation biologique des ravageurs dans les agro-écosystèmes, par l'utilisation de variétés résistantes comme première ligne de défense en plus de la lutte biologique, serait l'une des meilleures stratégies pour une gestion intégrée durable. Ceci requiert néanmoins la connaissance de la biodiversité dans les agro-écosystèmes mais également la connaissance de la bio-écologie des ravageurs et de leurs ennemis naturels (Van Lenteren et Overholt, 1994; Nwanze, 1997; Razzaghi *et al.*, 2011). Il est également nécessaire, pour une lutte efficace et efficiente, de comprendre les processus de la régulation biologique des ravageurs tels que la capacité des cultivars à limiter le développement des ravageurs ou à compenser leurs attaques, la réponse à certaines pratiques culturales et la distribution dans le paysage agricole ou encore l'impact des ennemis naturels comme les parasitoïdes (Cuevas-Reyes *et al.*, 2007; Valantin-Morison, 2012; Liere *et al.*, 2015).

Au Sénégal, dans le cadre de la réduction des pertes de production du mil dues aux ravageurs en particulier la mineuse de l'épi et les foreurs de tiges, les efforts faits en amélioration variétale ont surtout été orientés vers l'augmentation des rendements des variétés cultivées, même si des sources de résistance à ces principaux ravageurs ont été identifiées dans des études antérieures (Gupta, 1986; Ndoye *et al.*, 1986; Gahukar, 1987). Peu de recherches ont été effectuées dans l'adaptation aux conditions biotiques et socio-culturelles des producteurs pour réduire l'utilisation quasi exclusive des variétés locales au détriment des variétés améliorées.

En outre, une analyse de la recherche sur les parasitoïdes indigènes de la mineuse de l'épi et des foreurs de tiges a ressorti leur faible niveau de performance (Bhatnagar, 1987; Nwanze et Harris, 1992; Youm et Gilstrap, 1993; Bosquez-Perez *et al.*, 1994; Youm *et al.*, 1996; Overholt *et al.*, 1997; Chinwada, 2002). Cependant, le parasitisme augmente vers la fin de la saison de culture après que les dégâts ont été déjà occasionnés sur le mil (Bhatnagar, 1987; Nwanze et Harris, 1992). Pour les foreurs de tiges des céréales en général, très peu de données sont disponibles en Afrique de l'Ouest comparativement à l'Afrique de l'Est et du Sud où la liste des espèces de parasitoïdes est assez fournie (Polaszek, 1997; Overholt, 2000; Chinwada, 2002; Kfir *et al.*, 2002). Les parasitoïdes des larves de foreurs répertoriés comprennent principalement l'ectoparasitoïde, *Goniozus procerae* (Hymenoptera: Bethyliidae) et l'endoparasitoïde, *Syzeuctus sp* (Hymenoptera:

Braconidae) qui sont associés à *C. ignefusalis* au Sénégal (Ndoye, 1979; Ndoye, 1980; Gahukar, 1981). Pour la mineuse de l'épi, les parasitoïdes des œufs, *Trichogrammatoidea armigera* (Hymenoptera Trichogrammatidae) et des larves, *Bracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae) constituent les agents de lutte biologique les plus prometteurs (Bhatnagar, 1987; Bal, 1993; Karimoune *et al.*, 2018). Aussi, le renforcement du faible niveau de parasitisme par des lâchers augmentatifs de parasitoïdes a été effectué avec succès dans différents systèmes de cultures pour réduire les populations d'insectes ravageurs (Overholt, 2000; Gardner *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2010; Ba *et al.*, 2014; Kabore *et al.*, 2017). Cependant, au Sénégal, l'élevage et les tests de lâchers augmentatifs de *B. hebetor* initiés depuis les années 80 (Bhatnagar, 1989) restent à améliorer pour optimiser son efficacité en milieu paysan.

De nombreuses études ont montré l'étroite relation entre la fonction de régulation et l'importance de la biodiversité dans les agro-écosystèmes (Altieri, 1999; Bianchi *et al.*, 2006; Chaplin-Kramer et Kremen, 2012; Liere *et al.*, 2015; Lik, 2010; Melo *et al.*, 2016; Acosta *et al.*, 2017; Perez-Alvarez *et al.*, 2018). En effet, avec la pression foncière et l'accroissement des terres cultivées liés à la croissance démographique, les paysages ont fait souvent l'objet de pression anthropique ayant entraîné une simplification et fragmentation et donc conduit à une perte de la biodiversité y compris des insectes. L'effet du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes a été également très largement discuté. En effet, dans le cas des insectes, l'instabilité de la pluviométrie ainsi que les changements de température agissent sur la diversité et l'abondance des espèces en entraînant l'altération et la perturbation de leur comportement dans les environnements agricoles (Rosenzweig *et al.*, 2001; Mooney *et al.*, 2009; Bellard *et al.*, 2012; Pawson *et al.*, 2013; Prather *et al.*, 2013).

Pour contribuer à la connaissance de la biodiversité en général et de la bio-écologie des foreurs de tiges, de la mineuse de l'épi et de leurs ennemis naturels en particulier dans l'agro-écosystème du mil du Sénégal, il est donc très important de trouver les réponses à certains questionnements tels que:

- Quelles sont la diversité et l'abondance des insectes ravageurs et leurs ennemis naturels dans l'agro-écosystème du mil?
- Le renforcement de la régulation des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil grâce à l'utilisation de variétés de mil améliorées, résistantes et le lâcher augmentatif des parasitoïdes performants permettraient-ils de réduire les dégâts et pertes de rendement ?

Ce travail a été entrepris dans le cadre de l'amélioration durable de la productivité du mil et a comme objectif général la contribution à la mise en place d'une stratégie de gestion intégrée des principaux insectes ravageurs du mil. Spécifiquement, ce travail vise à :

(i) caractériser la diversité et l'abondance des insectes dans l'agro-écosystème du mil au niveau du bassin arachidier,

(ii) déterminer la distribution, l'incidence et les dégâts des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi sur la culture du mil en milieu paysan ainsi que le niveau de leur parasitisme naturel et l'impact des pratiques culturales,

(iii) identifier des variétés de mil résistantes ou tolérantes aux foreurs de tiges et à la mineuse de l'épi,

(iv) déterminer une période optimale de lâcher du parasitoïde *B. hebetor* pour la lutte contre la chenille mineuse de l'épi du mil.

Ces objectifs de recherche sont sous-tendus par des hypothèses selon lesquelles

(a) la spécificité et/ou les modifications apportées dans l'agro-écosystème du mil influencent la diversité;

(b) il existe un potentiel de régulation des foreurs de tige et de la mineuse de l'épi du mil dans le bassin arachidier qui peut être renforcée avec l'utilisation de la résistance variétale et des lâchers augmentatifs d'ennemis naturels.

Cette thèse est essentiellement structurée autour de cinq chapitres:

- le chapitre 1 est une synthèse bibliographique centrée sur l'origine et la systématique du mil, sa condition de culture, sa phénologie et ses contraintes biotiques;
- le chapitre 2 présente le bassin arachidier, ses caractéristiques physiques et agricoles;
- Le chapitre 3 traite de la diversité des communautés d'insectes ainsi que l'abondance et la dynamique de population des insectes dans l'agro-écosystème du mil;
- Le chapitre 4 aborde la situation actuelle des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil en milieu paysan notamment leur distribution, incidence, dégâts ainsi que l'impact de leurs ennemis naturels et des pratiques culturales des producteurs;
- Le chapitre 5 présente le criblage de nouvelles variétés de mil pour l'identification de sources de résistance contre les foreurs de tiges et la mineuse de l'épi du mil;
- Le chapitre 6 concerne l'évaluation de l'efficacité du lâcher augmentatif du parasitoïde *B. hebetor* en milieu paysan pour l'optimisation de la lutte contre la mineuse de l'épi de mil.

## CHAPITRE 1

### Synthèse Bibliographique

#### 1.1. Généralités sur le mil

##### 1.1.1. Origine et systématique

Le mil a été domestiqué à l'ouest du Sahara, il y'a 4892 ans, plus précisément dans la région nord du delta du Niger, à partir de ses ancêtres sauvages *P. glaucum monodii* (L.) R.Br., (Burgarella *et al.*, 2018). Ainsi à partir de cette région il s'est diffusé il y'a 4900 ans vers les autres régions de l'Afrique puis vers l'Inde et les Etats Unis (Reddy, 2017; Burgarella *et al.*, 2018).

Le terme "mil" désigne un groupe important de céréales cultivées ayant une valeur nutritionnelle élevée. Ce groupe renferme plusieurs espèces notamment *P. glaucum* généralement cultivée en Afrique de l'Ouest. *P. glaucum*, est une graminée annuelle qui appartient à la famille des Poacae et à la sous famille des Panicoidae. Appelée à l'origine *P. americanum* (L.) leeke, l'espèce a été révisée à *P. glaucum* et comprend plusieurs noms communs y compris le mil perlé, le petit mil, le mil à chandelle, le mil péniciliaire et "barja" en Inde. Espèce diploïde ( $2n=14$ ), c'est une plante à C4 avec une capacité élevée de photosynthèse et de production de matières sèches (Anonyme, 1991; Reddy, 2017).

##### 1.1.2. Exigences éco-climatiques

Le mil est connu pour être cultivé sur des sols pauvres, dans des zones où les températures et l'éclairement solaire sont élevés et où la pluviométrie est comprise entre 200 et 1500mm.

La germination du grain de mil se produit généralement à des températures supérieures à 12°C avec un optimum entre 23 et 40°C. La température optimale pour les premiers stades de développement est de 28°C tandis que la maturation des grains exige des températures journalières plus élevées.

En dépit de son adaptabilité à la sécheresse, le développement du mil exige une distribution régulière des pluies pendant la saison de culture. La pluviométrie optimale est comprise entre 400 et 700mm. Les quantités élevées de pluies pendant la floraison et la maturation des grains peuvent conduire à l'avortement, mais également à l'installation des certaines maladies.

Le mil est moins exigeant que les autres plantes cultivées concernant la qualité du sol. Cependant, il préfère les sols sablo-argileux bien drainés. Son développement est limité sur les sols argileux et ne tolère pas les zones inondées (Sarr, 1998; Polaszek and Khan, 2000; Anonyme, 2011; Sy, 2016).

### **1.1.3. Phénologie**

La durée de développement et de croissance du mil peut être subdivisée en deux grandes phases principales et comporte plusieurs stades allant du semis à la maturité (Maiti et Bidinger, 1981; Sy, 2016).

#### **1.1.3.1. Phase végétative**

Elle commence avec l'émergence du coléoptile à la surface du sol. Elle comporte plusieurs stades dont principalement la levée et le tallage. La levée a lieu après la germination 2 à 3 jours après semis. Pendant ce stade, le système racinaire primaire ainsi que de nombreuses racines adventices et les bourgeons de l'ensemble des feuilles se forment. Le tallage commence 20 - 25 jours après la levée (JAL) et se caractérise par la multiplication des bourgeons de la tige principale des jeunes plantules qui forment des talles (tiges secondaire). La plante poursuit son développement et atteint sa vitesse de croissance maximale 30 - 40 JAL. Le processus de formation de la panicule commence à ce stade avec l'arrêt de la production foliaire. La phase végétative se termine par l'apparition et le développement de la feuille étendard (feuille drapeau). Le dôme apical s'allonge et une constriction se forme à la base de l'apex avec le méristème qui change de fonction pour amorcer l'initiation de la panicule. A ce stade, le maximum de feuilles a été produit mais la croissance de la plante continue avec l'allongement des entre-nœuds.

#### **1.1.3.2. Phase de reproduction**

La phase de reproduction va de l'initiation de la panicule à la maturité physiologique ou complète. Pendant cette phase, l'accumulation de la biomasse concerne les tiges, les panicules, les grains (caryopses) ainsi que les feuilles et les tiges des talles susceptibles de produire des épis. Elle renferme les stades épiaison, floraison (femelle et mâle), grains laiteux, pâteux et durs. L'épiaison a lieu 50 - 60 JAL. A ce stade, la surface foliaire est à son maximum et la partie de la tige (pédoncule) comprise entre la feuille étendard et la panicule commence à s'allonger. La taille potentielle maximale de la panicule ainsi que le nombre de grains par panicule sont aussi déterminés. La floraison a lieu 2 à 3 jours plus tard après l'apparition effective de la panicule et correspond à 50% des plants avec les fleurs femelles et mâles apparues sur les épillets. Ce processus s'accompagne par l'élongation du dernier entre-nœud sur la tige principale. Immédiatement après la floraison, la fécondation se produit, suivie par la formation des grains. Les grains entament un processus de maturation qui dure environ 20 à 30 jours pendant lequel le fruit ou grain prend forme et passe par les stades laiteux, pâteux avant de durcir. Il se produit en même temps la senescence des feuilles basales qui virent du vert au jaune suite à la perte d'humidité.

### 1.1.3.3. Groupes de mils cultivés

Selon la durée du développement, les mils cultivés peuvent être répartis en trois groupes :

- les variétés tardives qui arrivent à maturité à 100 - 150 jours après semis (JAS). C'est le cas du mil de type Sanio au Sénégal, cultivé au Sud du pays où les précipitations sont favorables à son développement;
- les variétés précoces dont le cycle varie entre 80 - 100 JAS comme le cas du type Souna, cultivé au Nord et au Centre du Sénégal où la pluviométrie est faible et erratique;
- les variétés extra précoces qui bouclent leur cycle en 65 - 75 JAS comme le cas du Zongo, cultivé également dans les zones à faible pluviométrie (Gupta, 1986; Tapsoba, 1991).

### 1.1.4. Importance et utilisation

Le mil est cultivé dans plus de 30 pays à travers le monde sur près de 30 millions d'hectares de terre. Il représente la 6<sup>ème</sup> céréale en termes de production et nourrit plus de 100 millions de personnes. C'est une importante céréale dans les régions semi-aride d'Asie et d'Afrique du fait de sa part élevée dans l'alimentation des populations (Reddy, 2017). Les principaux pays producteurs sont l'Inde, le Niger, le Mali, le Nigeria, le Soudan, le Burkina Faso, le Sénégal, et le Tchad (FAOSTAT, 2017). Plus de la moitié de la production globale du mil provient de l'Inde et concernant l'Afrique, le Niger produit environ 30% du mil annuel (Jukanti *et al.*, 2016; FAOSTAT, 2017; Reddy, 2017).

Au Sahel, le mil représente environ 1/3 de la consommation totale des céréales alimentaires au Burkina Faso, au Tchad et en Gambie, plus de 1/3 au Mali et au Sénégal et plus de 2/3 au Niger (FAO, 1995). En termes de valeur nutritionnelle, le mil a une valeur énergétique élevée avec environ 350 – 360 kcal/100 g comparé aux céréales telles que le sorgho, le riz et le blé. Il comprend des protéines, des minéraux, de la vitamine, des fibres alimentaires, de la matière grasse et des antioxydants (Dykes et Rooney, 2007; Amadou *et al.*, 2013; Jukanti *et al.*, 2016; Ratnavathi, 2017; Jeeterwal *et al.*, 2018). Il possède également des vertus thérapeutiques dues à son potentiel prébiotique capable d'accroître la viabilité ou la fonctionnalité des pro-biotiques et prévient contre le diabète, le cancer, les maladies cardiovasculaires et dégénératives (Dykes et Rooney, 2007; Nambiar *et al.*, 2011; Amadou *et al.*, 2013; Jukanti *et al.*, 2016).

Dans les régions semi-arides d'Afrique et d'Asie, les grains de mil sont principalement utilisés pour l'alimentation humaine. La farine peut être utilisée pour faire des galettes, de la bouillie, du couscous ou «tiéré» au Sénégal et autres divers produits. Brassé et fermenté, le mil peut servir à la fabrication de bières artisanales (FAO, 1995; Jukanti *et al.*, 2016; Ratnavathi, 2017). Les tiges et les feuilles servent généralement à l'alimentation du bétail mais également à la construction des

clôtures des maisons, des jardins potagers, dans la confection des greniers, de nattes pour couchette et lorsqu'elles sont brûlées, la cendre peut être utilisée dans la poterie (Tapsoba, 1991). Dans les pays comme les Etats Unis et l'Europe, le mil est principalement produit pour l'alimentation du bétail et de plus en plus utilisé comme aliment de volailles (Reddy, 2017).

## **1.2. Principales contraintes biotiques du mil**

### **1.2.1. Mauvaises herbes et maladies**

Le mil est soumis à de nombreux stress biotiques tels que la compétition avec les mauvaises herbes, les maladies cryptogamiques, bactériennes, virales et les nématodes.

*Striga hermonthica* est l'une des espèces de striga les plus importantes. C'est une mauvaise herbe qui est rencontrée dans la plupart des zones de production du mil au Sahel en particulier au niveau du bassin arachidier du Sénégal (Ndoye *et al.*, 1986; Gworgwor, 2007). Les pertes rapportées sont variables et peuvent atteindre 60 à 70% sur le rendement (Ndoye *et al.*, 1986; Aladelele et Mustapba, 2003). C'est un parasite obligatoire dont la germination des grains est déclenchée par la présence de substances chimiques secrétées par les racines des plantes telles que les sesquiterpènes et strigolactones. En outre, des températures comprises entre 25 et 45°C qui sont combinées à des sols suffisamment humides contribuent à stimuler la germination des semences. Le développement de *S. hermonthica* affecte les capacités d'assimilation de l'eau, des nutriments, du carbone etc. par son hôte (Olivier, 1995; Van Mourik, 2007).

Les principales maladies cryptogamiques rencontrées sur le mil comprennent entre autres le mildiou, le charbon et l'ergot. Elles sont très largement distribuées dans la plupart des régions de production du mil en Afrique et en Asie (Mbaye, 1993; Thakur *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2015; Das, 2017; Zoeclanclounon *et al.*, 2018).

Le mildiou est la maladie la plus redoutable en raison de son potentiel épidémique. Les dégâts varient selon la région et la variété cultivée et peuvent occasionner jusqu'à 40% de pertes en rendement voire plus sur des variétés sensibles (Sharma *et al.*, 2015; Das, 2017; Zoeclanclounon *et al.*, 2018). Le pathogène responsable est *Sclerospora graminicola*. C'est un parasite oomycète obligatoire qui se reproduit de façon asexuée en produisant des sporanges et sexuée par le biais des oospores. Les oospores sont responsables des infections primaires tandis que les sporanges sont à l'origine des infections secondaires. L'humidité relative élevée (85 - 90%) et les températures modérées (20 - 30°C) favorisent le développement de la maladie. Sa dissémination dépend des conditions climatiques et de la vitesse du vent. Le mildiou est une maladie systémique dont l'infection s'exprime au niveau des feuilles et des épis. Les infections sévères causent la mort

des jeunes semis alors que les plantes les plus développées présentent des épis caractéristiques en forme de touffe appelés "épi vert" (Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017).

Le charbon attaque les épis de mil et peut causer des dégâts variables qui peuvent atteindre 30% de pertes sur le rendement voire plus lorsque les conditions sont favorables au développement de la maladie (Mbaye, 1993; Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017). Le pathogène responsable est *Tolyposporium* (syn. *Moesziomyces*) *penicillariae*. C'est un champignon basidiomycète qui survit sous forme de téléospore dans les grains infectés ou le sol. La germination des téléospores produit des sporidies qui sont disséminées par le vent et cause l'infection. Les infections secondaires sur des semis de mêmes dates sont rarement rencontrées (Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017).

L'ergot est une maladie qui attaque les épis de mil. Il est favorisé par l'humidité relative élevée (85 - 90%) et les températures modérées (20 - 30°C) et peut causer des pertes jusqu'à 70% sur le rendement et la qualité des grains (Mbaye, 1993; Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017). L'ergot est causé par un champignon ascomycète, *Claviceps fusiformis*. Les premières infections apparaissent sous forme de sécrétion mucilagineuse de couleur crème à rose appelée miellat qui dégouline des épillets. Le miellat sécrété contient de nombreux micro et macro-conidies. La propagation de l'infection aux épillets juxtaposés se fait par contact mécanique. Les épillets infectés produisent des sclérotés fongiques qui servent de source d'infection primaire à la prochaine culture. Ces sclérotés contiennent des alcaloïdes neurotoxiques qui peuvent affecter la santé humaine et animale lorsqu'ils sont ingérés (Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017).

D'autres maladies fongiques telles que la pyriculariose (*Pyricularia grisea* (Cooke) Sacc.) et la rouille (*Puccinia substriata* var. *indica* Ramachar & Cumm, syn. *P. penniseti* Zimm) infectent également le mil mais affectent surtout la qualité du fourrage. Ces maladies sont présentes en Afrique mais particulièrement importantes en Inde, en Amérique du Nord et du Sud (Mbaye, 1993; Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017).

Par ailleurs, les bactéries, les virus et les nématodes qui affectent le mil sont moins fréquents dans les zones de production et de moindre importance économique contrairement aux champignons. Cependant avec les modifications observées dans les zones de culture et le changement climatique, ces facteurs pourraient devenir importants sur la culture (Thakur *et al.*, 2011; Das, 2017).

### **1.2.2. Insectes ravageurs**

Les insectes ravageurs attaquent le mil du semis à la récolte (Gahukar, 1984). Ils appartiennent principalement aux ordres des lépidoptères, diptères et parfois coléoptères (Mbaye, 1993). Parmi ces insectes, on distingue plusieurs groupes y compris les plus importants appartenant aux groupes

des foreurs de tiges et des insectes de l'épi (Gahukar, 1984; Harris, 1995; Kalaisekar et Padmaja, 2017).

### 1.2.2.1. Foreurs de tiges

La majorité des foreurs de tiges rencontrés sur le mil appartiennent à l'ordre des lépidoptères. Parmi les lépidoptères foreurs de tiges, les espèces les plus fréquemment rencontrées sur les céréales appartiennent essentiellement aux familles des Noctuidae, Crambidae et Pyralidae (Maes, 2000; Assefa *et al.*, 2006; Assefa *et al.*, 2010). Il s'agit principalement du foreur des tiges de maïs, *Busseola fusca* Fuller (Lepidoptera : Noctuidae), du foreur rose, *Sesamia calamistis* Hampson (Lepidoptera : Noctuidae), du foreur africain de la canne à sucre *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera : Pyralidae) et du foreur des tiges de mil, *Coniesta ignefusalis* (Lepidoptera : Crambidae) (Nwanze et Harris, 1992; Polaszek et Khan, 2000; Kalaisekar et Padmaja, 2017).

#### 1.2.2.1.1. Importance et distribution

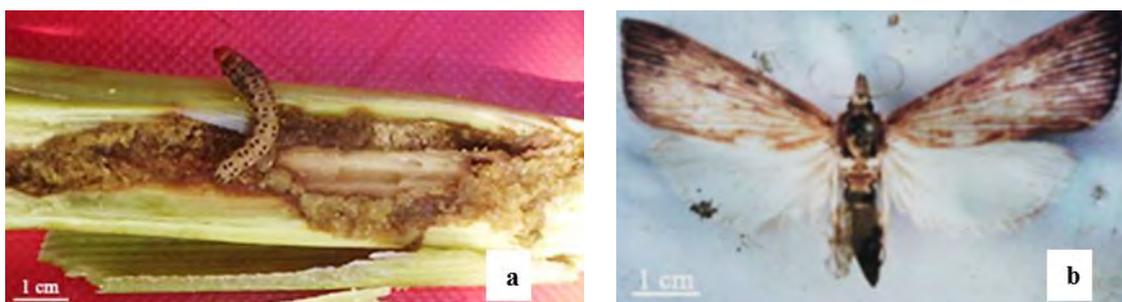
L'importance et la distribution des foreurs de tiges varient selon les régions. *C. ignefusalis* est l'un des principaux foreurs de tiges du mil en Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Gambie, Ghana, Guinée Bissau, Mali, Mauritanie, Niger, Nigeria, Tchad et Sénégal). Il a été également signalé en Angola, en Ethiopie et au Soudan. Il est retrouvé sur le sorgho, le maïs et la canne à sucre mais aussi sur de nombreuses Poacées sauvages telles que *Pennisetum purpureum*, *Panicum maximum* et *Andropogon gayanus* (Youm *et al.*, 1996; Maes, 2000; Polaszek et Khan, 2000; Kfir *et al.*, 2002). *S. calamistis* est principalement rencontrée en Afrique sub-saharienne où il attaque le maïs, le sorgho, le riz, le mil et la canne à sucre (Holloway, 2000; Kfir, 2000; Chinwada, 2002; Kfir *et al.*, 2002). *B. fusca* est une espèce également rencontrée en Afrique sub-saharienne, excepté à Madagascar. Moins rencontrée sur le mil, elle peut causer des dégâts importants en Afrique australe (Zimbabwe, Malawi, Zambie, Mozambique et l'Afrique du Sud), de l'Est (Kenya, Uganda, et Tanzanie) et de l'Ouest (Nigeria, Ghana, Côte d'ivoire) sur le maïs et le sorgho. Elle est aussi retrouvée sur le riz et la canne à sucre (Nwanze et Harris, 1992; Holloway, 2000; Kfir *et al.*, 2002; Assefa *et al.*, 2010). *E. saccharina* est un foreur rencontré en Afrique australe principalement sur la canne à sucre. Elle est retrouvée en Afrique de l'Ouest et du centre sur le maïs. Le sorgho, le mil et le riz subissent aussi les attaques de ce foreur dans une moindre mesure (Bosquez-Perez et Schulthess, 2000; Kfir *et al.*, 2002; Assefa *et al.*, 2006).

#### 1.2.2.1.2. Biologie des foreurs de tiges

La biologie des foreurs de tiges a été étudiée par de nombreux auteurs (Bal, 1988b; Youm *et al.*, 1996; Maes, 2000; Kfir *et al.*, 2002; Mengistu *et al.*, 2009). Le cycle de développement est assez similaire pour l'ensemble des foreurs de tiges de céréales (Harris, 1989). L'adulte émerge de la

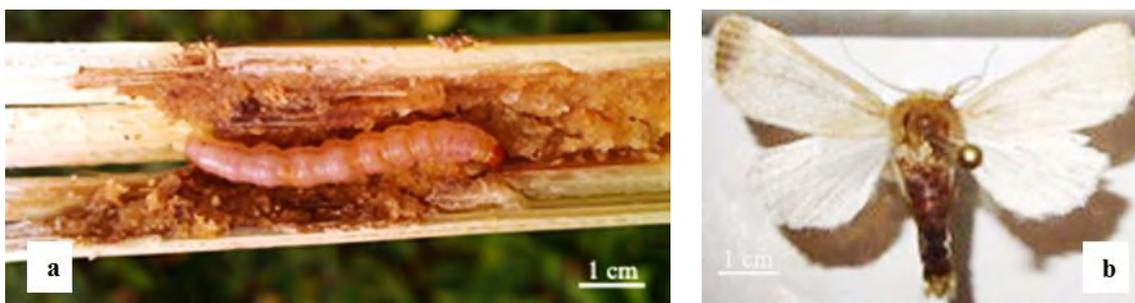
tige au crépuscule et reste actif au cours de la nuit. Le jour, il reste au repos sur les plantes ou les débris de végétaux et ne vole que brièvement lorsqu'il est dérangé. Aux premières heures de leur émergence, les femelles se déplacent sur de courtes distances en émettant des phéromones d'accouplement. L'accouplement a généralement lieu au bout de quelques heures après l'émergence.

En ce qui concerne *C. ignefusalis*, chaque femelle peut pondre jusqu'à 200 œufs en groupe de 20 à 50 sur les gaines foliaires (Harris, 1989; Youm *et al.*, 1996; Maes, 2000). Les œufs éclosent 12 à 15 jours plus tard et dans les 24h suivant l'éclosion, les larves néonates commencent à creuser des galeries dans les gaines foliaires et les tiges. Les larves (Figure 1 a) se développent 30 à 40 jours en passant par 6 - 7 stades larvaires avant de se nymphoser (Harris, 1989; Youm *et al.*, 1996; Maes, 2000). Une migration des larves entre les plantes jusqu'à 1,8m a été observée (Youm *et al.*, 1996). Les adultes (Figure 1 b) émergent 7 à 15 jours suivant la nymphose. Généralement 2 à 3 générations sont observées et à la fin de la saison, les larves entrent en diapause dans les tiges. Le plus souvent, la diapause dure toute la saison sèche (Harris, 1989; Youm *et al.*, 1996; Kfir *et al.*, 2002; Maes, 2000).



**Figure 1:** *Coniesta ignefusalis* a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.

Les femelles de *S. calamistis* peuvent pondre chacune jusqu'à 300 œufs en amas de 20 - 100 entre les gaines foliaires inférieures et la tige (Harris, 1989; Holloway, 2000; Mengistu *et al.*, 2009). L'éclosion a lieu 7 à 10 jours plus tard et les jeunes larves consomment les tissus des gaines foliaires avant de pénétrer dans la tige (Harris, 1989; Holloway, 2000). Le stade larvaire (Figure 2 a) dure 27 - 36 jours voire plus en fonction des conditions du milieu et comprend 5 à 6 mues (Holloway, 2000; Mengistu *et al.*, 2009). Certaines larves peuvent migrer sur d'autres plantes durant leur développement (Harris, 1989). Les adultes (Figure 2 b) émergent dans les 10 à 15 jours suivant la nymphose (Harris, 1989; Holloway, 2000). Jusqu'à 6 générations sont observées et généralement le cycle se poursuit toute l'année avec les larves qui survivent pendant la saison sèche sur les plantes sauvages ou les cultures de céréales en contre-saison (Teetes *et al.*, 1983; Harris, 1989; Holloway, 2000).



**Figure 2:** *Sesamia calamistis* a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.

Comme *S. calamistis*, les femelles de *B. fusca* déposent les œufs en amas de 30 à 100 entre les gaines foliaires et la tige avec un total d'environ 200 œufs pondus par femelle (Harris, 1989; Holloway, 2000). Les larves (Figure 3 a) migrent jusqu'au verticille foliaire pour consommer les jeunes feuilles avant de pénétrer dans la tige. Une migration des larves au plantes avoisinantes est souvent observée (Harris, 1989; Holloway, 2000; Kfir, 2000). Les larves passent par 6 à 8 mues avant de se nymphoser pour donner des adultes (Figure 3 b) 9 à 20 jours plus tard (Teetes *et al.*, 1983; Harris, 1989; Holloway, 2000). Généralement 3 générations sont observées voire 4 selon les conditions du milieu avec la dernière qui est la génération diapausante (Teetes *et al.*, 1983; Harris, 1989; Holloway, 2000).



**Figure 3:** *Busseola fusca* a) Larve âgée dans une galerie d'une tige de mil b) Adulte.

Quant à *E. saccharina*, les femelles pondent jusqu'à 600 œufs en groupe de 2 - 200 souvent en dessous des gaines foliaires. Les œufs éclosent 5 à 7 jours plus tard et les jeunes larves se nourrissent sur les tissus des gaines foliaires avant de pénétrer dans les tiges (Teetes *et al.*, 1983; Harris, 1989; Maes, 2000). La période larvaire (Figure 4 a) dure entre 30 - 60 jours en passant par 5 à 6 mues (Teetes *et al.*, 1983; Bal, 1988b; Maes, 2000). La nymphose a lieu en parti à l'extérieur de la tige. La larve tisse un cocon assez solide qui fait sailli partiellement à travers le trou de sortie creusé sur la tige (Chinwada, 2002). Les adultes (Figure 4 b) émergent 7 à 13 jours plus tard. Aucune diapause n'a été signalé et généralement entre 6 à 8 générations sont observées (Teetes *et al.*, 1983; Maes, 2000).



**Figure 4:** *Eldana saccharina* a) Larve âgée b) Adulte.

#### 1.2.2.1.3. Dégâts et pertes de production

Les attaques précoces de foreurs sur les jeunes plants sont généralement responsables des "cœurs morts" (Figure 5) résultant de la destruction du méristème apical. Les attaques tardives induisent un avortement des épis ou la verse à cause de la formation de tunnels engendrant ainsi l'interruption du système vasculaire qui empêche la croissance de la plante et le remplissage des grains (Nwanze et Harris, 1992; Youm *et al.*, 1996; Kfir *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2012).



**Figure 5:** Symptômes des attaques précoces de foreurs sur le mil ou "cœur mort".

Les pertes de rendement dues aux foreurs de tiges varient selon les espèces, la plante hôte et la région. Sur le mil, une infestation précoce de 5 à 10 larves de *C. ignefusalis* par plants peut occasionner entre 24 et 100% de pertes (Ajayi, 1990; Drame-Yaye *et al.*, 2003).

#### 1.2.2.2. Insectes de l'épi

Pour les insectes ravageurs du mil, ceux qui attaquent l'épi sont parmi les plus dommageables à la culture à cause des pertes directes engendrées sur les organes reproducteurs ou les graines en développement (ROCAFREMI, 2002). Ce sont des insectes appartenant principalement aux ordres des Coléoptères, Hémiptères, Diptères et Lépidoptères (Ndoye *et al.*, 1986; Sharma et Davies, 1988; Mbaye, 1993).

Parmi les coléoptères, différentes espèces de Meloïdae telles que *Cylindrothorax spp*, *Psalydolytta spp* et *Mylabris spp*, rongent les ovaires et affectent ainsi le remplissage des grains.

Des dégâts jusqu'à 48% dus à ces insectes ont été notés sur des semis précoces de mil toutefois, ils peuvent être beaucoup plus élevés en cas d'attaques sporadiques (Zethner et Laurence, 1988; Gahukar, 1991; Coop et Croft., 1992; Grunshaw *et al.*, 1994). Par ailleurs, les Scarabeidae comme les espèces *Rhinyptia infuscata*, *Pachnoda spp* et *Coryna spp* peuvent causer également des dégâts considérables (Nwanze et Harris, 1992; Harris, 1995).

Les Hémiptères, en l'occurrence *Dysdercus spp*, *Diploxys spp.* et *Spilostethus spp.* attaquent également le mil au stade laiteux vidant ainsi les grains (Guèvremont, 1982; NDoye et Gahukar, 1987; Harris, 1995).

Parmi les diptères qui occasionnent des dégâts sur le mil figurent les cécidomyies avec notamment *Geromyia penniseti*. Les dégâts occasionnés peuvent être énormes jusqu'à 90% de pertes lorsque leurs pics de population coïncident avec le stade de floraison de la culture (Guèvremont, 1982; NDoye et Gahukar, 1987; Harris, 1995).

Parmi les insectes de l'épi du mil, les lépidoptères constituent le groupe le plus important y compris les chenilles mineuses qui renferment une dizaine d'espèces des genres *Heliocheilus*, *Masalia*, *Adizura*, *Helicoverpa* etc. (Vercambre, 1978; NDoye et Gahukar, 1987; Nwanze et Harris, 1992; ROCAFREMI, 2002; Kalaisekar et Padmaja, 2017).

#### 1.2.2.2.1. Mineuse de l'épi du mil

Dans le Sahel comme au Sénégal, la mineuse, *Heliocheilus albipunctella* est l'une des espèces les plus nuisibles sur l'épi du mil. Espèce jadis secondaire, elle est devenue l'un des principaux ravageurs de l'épi du mil suite à sa résurgence après la sécheresse des années 70 coïncidant avec les traitements antiacridiens qui ont surtout conduit à l'élimination de ses ennemis naturels. *H. albipunctella* est un lépidoptère, noctuidae de la sous famille des Heliiothinae qui est inféodée au mil en zone sahélienne (Maiga, 1984).

##### 1.2.2.2.1.1. Bio-écologie

*H. albipunctella* est rencontrée entre les isohyètes 100 et 700mm couvrant entre autres le Burkina Faso, la Gambie, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nord du Nigéria, le Sénégal, le Sudan, le Tchad et le Nord du Togo (Nwanze et Sivakumar, 1990; Harris, 1995). Elle constitue un des problèmes majeurs au Sénégal notamment dans le bassin arachidier (NDoye et Gahukar, 1989; Baldé, 1993; Harris, 1995). En ce qui concerne la biologie de *H. albipunctella*, elle a fait l'objet de nombreuses études notamment au Niger et au Sénégal (Vercambre, 1978; Guèvremont, 1982; NDoye, 1988; NDoye et Gahukar, 1989; Nwanze et Sivakumar, 1990). Il s'agit d'une espèce monovoltine et l'émergence des adultes débute environ un mois après une première pluie utile d'environ 20mm (NDoye, 1988; Nwanze et Sivakumar, 1990). L'envergure du papillon varie entre

23 et 27mm. Le dimorphisme sexuel est très marqué et se traduit par la présence de longues aires hyalines chez le mâle et la modification très visible des nervures costales et radiales au niveau des ailes antérieures (Ndoye, 1988; Ndoye et Gahukar, 1989). Chez la femelle, les ailes antérieures sont roux-marron avec une série de ponctuations blanches disposées en demi-cercle sur le bord distale (Ndoye, 1988). Dès leur émergence, les mâles et les femelles s'accouplent, puis les femelles vont à la recherche d'épis de mil favorables à la ponte, c'est-à-dire ceux aux stades d'épiaison et de floraison femelle (Guèvremont, 1982; Gahukar, 1990a). Les œufs peuvent souvent être pondus sur des épis en floraison mâle (Figure 6). Le cycle de développement ne peut pas être complété lorsque l'émergence des adultes est asynchrone avec le stade d'épiaison du mil. La ponte a lieu à peine un mois après la première pluie utile, coïncidant souvent avec les mois d'août et septembre pour une durée d'environ un mois (Guèvremont, 1982; Ndoye et Gahukar, 1989). Généralement, 80% des œufs sont pondus au niveau du tiers supérieur de l'épi (Guèvremont, 1982; Gahukar, 1990a).



**Figure 6:** Femelle de *H. albipunctella* en oviposition sur un épi de mil en floraison mâle.

Les œufs sont pondus séparément ou par groupe de deux, trois ou plus (Figure 7). Ils sont de petites tailles avec des rayures, de forme oblongue et de couleur blanchâtre à marron selon le degré du développement embryonnaire (Ndoye, 1988). Ils sont d'aspect noir lorsqu'ils sont parasités notamment par *T. armigera* (Bal, 1993). Les œufs éclosent après 3 à 5 jours d'incubation.



**Figure 7:** Œufs de *H. albipunctella* sur épi de mil

Les larves néonates mesurent à peine 1mm tandis que celles plus âgées font 20 à 25mm de long (Ndoye, 1988). Les larves présentent une coloration qui varie du vert au rouge en passant par le jaune selon les stades de développement intermédiaire (Ndoye, 1988; Sarr, 1998). Elles disposent également d'une capsule céphalique testacée caractéristique de 1 à 4mm (Sarr, 1998). Jusqu'à 6 stades larvaires ont été décrites (Ndoye, 1988). Toutefois, selon la taille de la capsule céphalique et des couleurs entre autres, les larves de *H. albipunctella* ont été reclassées en quatre stades larvaires L1, L2, L3 et L4 (Sarr, 1998). Les larves âgées sont relativement trapues et rayées d'une bande claire partant de la tête jusqu'à l'extrémité anale sur chaque côté (Ndoye, 1988). Elles tombent au sol avant de s'enfouir à 15 - 20cm de profondeur où survient la mue nymphale 4 à 5 jours plus tard pour donner des chrysalides (Ndoye, 1988; Nwanze et Sivakumar, 1990). Les chrysalides sont de couleur rougeâtre et sont rencontrées particulièrement au niveau des radicelles des poquets de mil. Elles restent en diapause puis en quiescence toute la saison sèche (10 – 11 mois) dans les conditions naturelles (Ndoye, 1988). La diapause a pu être levée en 12 - 14 jours au laboratoire à 27°C et 85% d'humidité relative (Gahukar *et al.*, 1986a; Ndoye, 1988).

#### 1.2.2.2.1.2. Dégâts et pertes de production

A l'éclosion, les larves néonates commencent à sectionner les glumes et à perforer les ovaires (Ndoye, 1991). Les larves âgées sectionnent les pédoncules floraux et engendrent l'avortement des épillets et la chute des grains (Figure 8).



**Figure 8:** Larves de *H. albipunctella* dans des galeries, a) stade L2 et b) stade L4.

Au fur et à mesure de leur progression, les larves soulèvent les épillets sectionnés laissant ainsi derrière des galeries de forme hélicoïdale (Figure 9) qui donnent un aspect caractéristique de la symptomatologie des attaques (Gahukar *et al.*, 1986a; Gahukar, 1990a). Les galeries sont d'autant plus importantes que les larves se développent jusqu'au stade L4. L'importance des dégâts dépend de la coïncidence entre le pic de la population de la mineuse et le stade d'épiaison du mil, mais aussi de la sensibilité de la variété cultivée (Vercambre, 1978; Ndoye et Gahukar, 1989). La longueur de l'épi, le degré de remplissage des grains et le nombre de galeries permettraient de quantifier les pertes dues à *H. albipunctella* (Jago, 1993; Goudiaby *et al.*, 2018). Les dégâts sont variables et les pertes estimées peuvent aller de 16,7% à 46,3% voire 85% (Gahukar *et al.*, 1986a; Nwanze et Sivakumar, 1990; Mbaye, 1993).



**Figure 9:** Galeries caractéristiques de la progression des dégâts sur l'épi de mil.

### 1.2.2.3. Autres insectes

De nombreuses autres espèces d'insectes appartenant à divers ordres notamment des coléoptères, lépidoptères, dermaptères, orthoptères, etc. s'attaquent également au mil.

Les coléoptères *Lema planifrons* et *Chaetocnema tibialis* sont les principales espèces de chrysomelidae qui attaquent les jeunes semis du mil. Elles consomment l'épiderme des feuilles entraînant ainsi une décoloration entière et un dessèchement de ces dernières. Les infestations sont souvent sporadiques mais les dégâts peuvent être très élevés en cas de sécheresse prolongée (Ndoye *et al.*, 1986; Nwanze et Harris, 1992; Baldé, 1993).

Parmi les lépidoptères, les espèces telles que *Helicoverpa armigera* Hubner (Lepidoptera: Noctuidae), *Eublemma gayneri* (Lepidoptera: Noctuidae), *Pyroderces spp.* (Lepidoptera: Cosmopterigidae) constituent des ravageurs occasionnels d'une moindre importance.

Toutefois, leur incidence peut être aggravée par les épis lâches qui facilitent la protection des larves. Ces espèces attaquent parfois le mil en rongant progressivement les grains au stade laiteux à pâteux et en sectionnant les épillets (Gahukar, 1984; Ndoye *et al.*, 1986). Les espèces phyllophages telles que *Spodoptera exempta*, *Spodoptera littoralis* et *Mythimna loreyi* attaquent aussi le mil et peuvent causer une défoliation complète de la plante. Ce sont généralement des espèces sporadiques dont la sévérité des dégâts est accentuée par l'alternance des périodes humides et de sécheresses pendant la saison de culture (Ndoye *et al.*, 1986; Nwanze et Harris, 1992). La chenille poilue *Amsacta moloneyi* Druce (Lepidoptera: Arctiidae) s'attaque également aux jeunes plants du mil. Généralement rencontrée sur l'arachide et le niébé, elle peut causer annuellement des dégâts considérables sur le mil au Sénégal et dans plusieurs pays du Sahel (Ndoye, 1988; Ndoye et Gahukar, 1989).

*Forficula senegalensis* Serv. (Dermaptera : Forficulidae) est le dermaptère le plus connu qui peut occasionner des dégâts assez importants sur le mil. Les adultes envahissent le mil à la montaison mais les jeunes individus apparaissent peu après le début de l'épiaison. Les adultes et les jeunes consomment les ovaires et autres organes des plantes (Guèvremont, 1982).

Les acridiens qui attaquent le mil et sont susceptibles de revêtir une importance économique incluent les sauteriaux qui sont les plus inféodés au mil. Parmi les sauteriaux, *Oedaleus senegalensis* Krauss (Orthoptera: Acrididae) peut parfois causer des dégâts importants sur la culture (Launois, 1989; Bal *et al.*, 2015). Toutefois, *Schistocerca gregaria* F. (Orthoptera : Acrididae) reste le plus redoutable à cause des invasions difficilement maîtrisables avec des interventions très coûteuses. Il détruit tout ce qui est vert sur son passage et peut causer des pertes pouvant aller jusqu'à 100% sur les cultures (Mbaye, 1993).

### **1.2.3. Méthodes de lutte contre les principaux insectes ravageurs du mil**

Plusieurs méthodes de lutte ont été utilisées contre les insectes ravageurs du mil. Parmi celle-ci figurent la lutte chimique, culturale, variétale, biologique et la lutte intégrée.

#### **1.2.3.1. Lutte culturale**

Les pratiques culturales sont des outils de défense de culture qui ont toujours été utilisées traditionnellement et constituent un des éléments centraux dans la gestion intégrée contre les insectes ravageurs (Kumar, 1991; Van Den Berg *et al.*, 2000). Les pratiques culturales les plus communément utilisées sont entre autres le travail du sol, la rotation des cultures, l'association des cultures, la destruction des résidus de récolte, le décalage des dates de semis, l'élimination manuelle des plants infestés, l'utilisation de fertilisants, etc. Toutes ces pratiques nécessitent néanmoins la connaissance de la bio-écologie des différents insectes (Ajayi, 1989; Kumar, 1991).

En ce qui concerne les foreurs de tiges, leur mode de gestion inclut souvent la destruction des chaumes à la récolte notamment pour *B. fusca* et *C. ignefusalis* qui passent la saison sèche en diapause dans les tiges (Youm *et al.*, 1996; Ajayi, 2000). Les premiers semis après la première pluie utile contribuent également à réduire les dégâts de *B. fusca* et *S. calamistis* (Ajayi, 2000). La fertilisation à base de phosphate à raison de 50 - 300 kg/ha de même que l'utilisation de l'azote (N) à des doses minimales permettent de réduire l'infestation et les dégâts liés aux foreurs de tiges (Gahukar, 1992; Wale *et al.*, 2006b; Tanzubil, 2014).

Pour *H. albipunctella*, le décalage de la date de semis par rapport à la première pluie utile peut être un moyen efficace pour éviter la coïncidence entre l'épiaison du mil et le pic de populations (Ndoye, 1979). Le labour des champs à la récolte afin d'exposer les chrysalides de la mineuse a également été recommandé (Gahukar, 1990a; Lawani, 1982). Au Sénégal, le niveau d'infestation mais également le nombre de larves de la mineuse de l'épi ont pu être réduit en appliquant soit de l'urée à la dose de 50 - 200 kg/ha soit de l'engrais NPK (10.20.20) en raison de 50 - 300 kg/ha (Gahukar, 1992). L'application de 20 kg/ha du triple phosphate a également conduit à la réduction des attaques de *H. albipunctella* jusqu'à 36% au Soudan (Gahukar et Ba, 2019).

### **1.2.3.2. Lutte chimique**

L'utilisation ou non de produits phytosanitaires par les agriculteurs dépend de leur perception du problème et du résultat potentiel des actions de lutte. Généralement, les petits producteurs utilisent très peu de produits chimiques (Van Den Berg et Nur, 2000). Dans tous les cas, la lutte chimique s'annonce difficile étant donné qu'il nécessite la connaissance au moins de la bio-écologie et du seuil économique des insectes ravageurs. Pour appliquer correctement ces produits avec efficacité, les techniques d'application d'insecticide basées sur la localisation du ravageur mais aussi sur les formes de produits chimiques s'avèrent indispensables (Kumar, 1991; Calvet *et al.*, 2005; Gray *et al.*, 2009).

Au cours des années 1970, les produits chimiques les plus couramment utilisés contre les foreurs de tiges incluaient le DDT, et le furadan qui sont actuellement interdits. Le carbaryl et le diméthoate se sont aussi montrés efficaces contre les foreurs de tiges. Cependant, en raison du comportement cryptique des espèces, la réussite d'une lutte chimique est limitée (Nwanze et Sivakumar, 1990; Youm *et al.*, 1996).

En ce qui concerne *H. albipunctella*, l'endosulfan a été utilisé à la dose de 525 - 700 mg/ha (Vercambre, 1978). L'application de trichlorfon (Dipterex) en association avec un inhibiteur de la chitine telle que la SIR 8514 à raison de 1 kg/ha a permis de lutter efficacement contre la mineuse de l'épi (Guèvremont, 1982). En outre, l'utilisation de diflubenzuron, appliqué à la dose de 100 g/ha sur les larves de premier stade avant leur insertion sous les épillets de la chandelle s'est

montrée efficace (Gahukar, 1990b). L'application de produit chimique devient difficile après l'insertion des larves de la mineuse sous les épillets (Touré et Yéhouéno, 1995; Payne *et al.*, 2011). Au Mali, l'application d'extraits aqueux de Neem à 0,5 - 1% a conduit à une réduction du niveau d'infestation de la mineuse de l'épi avec un effet résiduel jusqu'à 7 jours (Gahukar et Ba, 2019).

### 1.2.3.3. Résistance variétale

La résistance d'une plante est sa capacité à subir moins de dégâts ou à être moins infestée qu'une plante de la même espèce dans les mêmes conditions. Cette résistance peut se manifester par une non préférence de la variété par l'insecte également appelée antixénose. Une fois la variété infestée par l'insecte, celle-ci peut s'avérer non favorable au développement de celui-ci soit du fait de la présence de substances toxiques, antinutritionnels ou de l'absence d'éléments essentiels. Ce mécanisme est connu sous le nom d'antibiose. Enfin certaines variétés bien que fortement infestées arrivent par des mécanismes à supporter les dégâts par un système de compensation. Ce mécanisme est connu sous le nom de tolérance (Kumar, 1991). L'utilisation de plantes résistantes est une voie prometteuse pour limiter les dégâts dus aux insectes ravageurs et les pertes de rendement occasionnées. En outre, la résistance variétale constitue une première ligne de défense contre les ravageurs des cultures mais aussi une des méthodes de luttés alternatives moins onéreuses et respectueuses de l'environnement (Youm *et al.*, 1996; Seshu Reddy, 2000; Sarao et Mahal, 2012; Sharma *et al.*, 2013).

Sur le mil, les variétés INMB-I-06, INMB-218, INMB-155 se sont montrées tolérantes à *C. ignefusalis* au Niger, tandis qu'au Sénégal, la variété Zongo a présenté une résistance par antibiose (Ndoye *et al.*, 1986).

Pour *H. albipunctella*, un certain nombre de variétés de mil ont montré une résistance avec notamment les variétés IBV 8004, IBV 8001, ICH-165, ICMS-7838 et Souna (Guèvremont, 1982; Gupta, 1986; Ndoye *et al.*, 1986; Gahukar, 1987). Il s'agit généralement de résistance liée à l'absence de préférence de ponte par les femelles, à la tolérance par compensation des dégâts mais également à l'évitement variétal appelé aussi pseudo résistance, c'est à dire absence de coïncidence entre la période sensible des variétés et le pic de population du ravageur concerné dans certains cas (Ndoye *et al.*, 1986). En outre, les tentatives de sélection variétale menées jusque-là pour la résistance vis-à-vis de *H. albipunctella* n'ont pas montré un véritable succès. Toutefois, l'absence de techniques adéquates de criblage reste un des obstacles majeurs à la mise au point de variétés résistantes et productives (Youm *et al.*, 1996; Payne *et al.*, 2011).

#### 1.2.3.4. Lutte biologique

La lutte biologique consiste à utiliser des organismes vivants (arthropodes prédateurs ou parasitoïdes, entomopathogènes, etc.) pour lutter contre les ravageurs dans des écosystèmes donnés (Kumar, 1991). En Afrique, plusieurs parasitoïdes, prédateurs et organismes entomopathogènes ont été mentionnés dans la régulation des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil (Gahukar *et al.*, 1986a; Batnagar 1987; Ndoye, 1991; Bosquez-Perez *et al.*, 1994; Sarr, 1998; Kfir *et al.*, 2002; Hordzi et Botchey, 2012; Tounou *et al.*, 2013). Il existe une large gamme de parasitoïdes des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil en Afrique qui s'attaquent aux œufs, larves et nymphes. Ces parasitoïdes appartiennent essentiellement aux ordres d'hyménoptères et de diptères.

Les principaux parasitoïdes des œufs des foreurs de tiges sont *Trichogramma sp*, *Trichogrammatoidea lutea* Girault, *Telenomus busseola* Gahan et *T. isis* Polaszek (Bonhof *et al.*, 1997; kfir, 2000; Kfir *et al.*, 2002). Les larves et les nymphes sont parasitées par différentes espèces y compris *G. procera* Risbec, *Syzeuctus sp*, *Pediobus furvus* Gahan (Hymenoptera : Eulophidae), *Psilochalsis* (syn. *Hyperchalcidia*) *soudanensis* Steffan (Hymenoptera : Chalcididae) , *Chasmias sp* (Hymenoptera : Ichneumonidae), *Sturmiopsis parasitica* Curran (Diptera : Tachinidae), *Cotesia sesamia* Cameron (Hymenoptera : Braconidae), *Apanteles sesamia* Cameron (Hymenoptera : Braconidae), *Bracon spp* (Hymenoptera : Braconidae), *Dentichasmias busseola* Heinrich (Hymenoptera : Ichneumonidae) (Ndoye, 1979; Gahukar, 1981; Van Achterberg et Walker, 2000; Chinwada, 2002; Mailafiya *et al.*, 2009). Le parasitisme, faible en général, a lieu tardivement dans la saison de culture (Bosquez-Perez *et al.*, 1994; Youm *et al.*, 1996).

Pour la mineuse de l'épi du mil, les œufs sont généralement attaqués par *T. armigera* et *Copidosoma (Litomastix) primulum* Mercet (Hymenoptera : Encyrtidae) (Gahukar, 1981; Gahukar *et al.*, 1986a; Bal, 1993; Sow *et al.*, 2018). Les parasitoïdes des larves et des nymphes sont entre autres *B. hebetor*, *Habrobracon (Bracon) brevicornis* Wesmael (Hymenoptere: Braconidae) *Cardiochiles (Schoelandella) sahelensis* Huddleston and Walker (Hymenoptere: Braconidae), *Pristomerus pallidus* Kriechbaumer (Hymenoptere: Ichneumonidae) et *Palexorista quadrizonula* Thomson (Diptera: Tachinidae) (Gahukar, 1981; Gahukar *et al.*, 1986a; Bal, 1993; Sarr, 1998; Sow *et al.*, 2018). Cependant, *B. hebetor* est l'un des meilleurs parasitoïdes des larves de la mineuse de l'épi du mil (Bhatnagar, 1987; Ndoye, 1991; Payne *et al.*, 2011). *B. hebetor* est un ctoparasitoïde grégaire et cosmopolite (Figure 10) qui est retrouvé chez plusieurs lépidoptères nuisibles des grains stockés et des cultures (Milonas, 2005).



**Figure 10:** Femelle de *B. hebetor*

La femelle paralyse les larves de ses hôtes en leur injectant un venin à travers plusieurs piqûres (Figure 11) et dépose ses œufs sur la larve devenue complètement immobile (Ndoye et Gahukar, 1989). Une femelle peut produire jusqu'à 100 œufs voire 800 œufs durant tout son cycle de vie selon l'espèce hôte parasitée (Wang *et al.*, 2013; Ghimire et Phillips 2014). En conditions contrôlées, l'incubation des œufs dure à peine 2 jours et la vie larvaire environ 5 jours.



**Figure 11:** Larve de *H. albipunctella* parasitée par *B. hebetor*

La larve pré-nymphale se tient à côté de la dépouille de la chenille et commence à tisser son cocon (Figure 12) pour passer au stade nymphal qui dure 6 jours (Ndoye et Gahukar, 1989; Ba *et al.*, 2013).



**Figure 12:** Dépouille d'une larve de *H. albipunctella* avec des cocons de *B. hebetor*

Le taux de parasitisme varie fortement d'une année à l'autre et peut aller jusqu'à 95% de mortalité des larves au Sahel (Bhatnagar, 1987; Nwanze et Harris, 1992). Un lâcher de *B. hebetor* peut être effectué directement en libérant les jeunes femelles fécondées dans les champs ou à l'aide de larves hôtes préalablement parasitées telles que *Ephestia kuheniella* Zeller (Lepidoptera:Pyralidae), *Corcyra cephalonica* Stainton (Lepidoptera:Pyralidae), etc. (Bhatnagar, 1989; Ba *et al.*, 2013; Ba *et al.*, 2014; Kabore *et al.*, 2017). Toutefois, le choix du mode de lâcher dépend de plusieurs facteurs tels que les conditions du milieu d'accueil, les caractéristiques intrinsèques du parasitoïde, de l'hôte et du ravageur cible, le niveau de maîtrise des techniques d'élevage et de lâcher du personnel de laboratoire ou de terrain.

## CHAPITRE 2

### Caractéristiques de l'Environnement du Bassin Arachidier

#### 2.1. Présentation du bassin arachidier

Le bassin arachidier correspond à la première région agricole du Sénégal où domine la culture arachidière. C'est une zone située au centre-ouest du pays, représentant 1/3 de la superficie totale du pays et abritant plus de 80% de la population rurale estimée à 1 244 241 habitants (Dione *et al.*, 2008; Kouma *et al.*, 2017). Il comprend la partie Sud qui est constituée des régions de Kaolack, Fatick et Kaffrine et la zone Nord qui couvre la région administrative de Diourbel, une partie de la région de Thiès et de Louga (Fall et Lo, 2009; Bignebat et Sakho-Jimbira, 2013) (Figure 13).

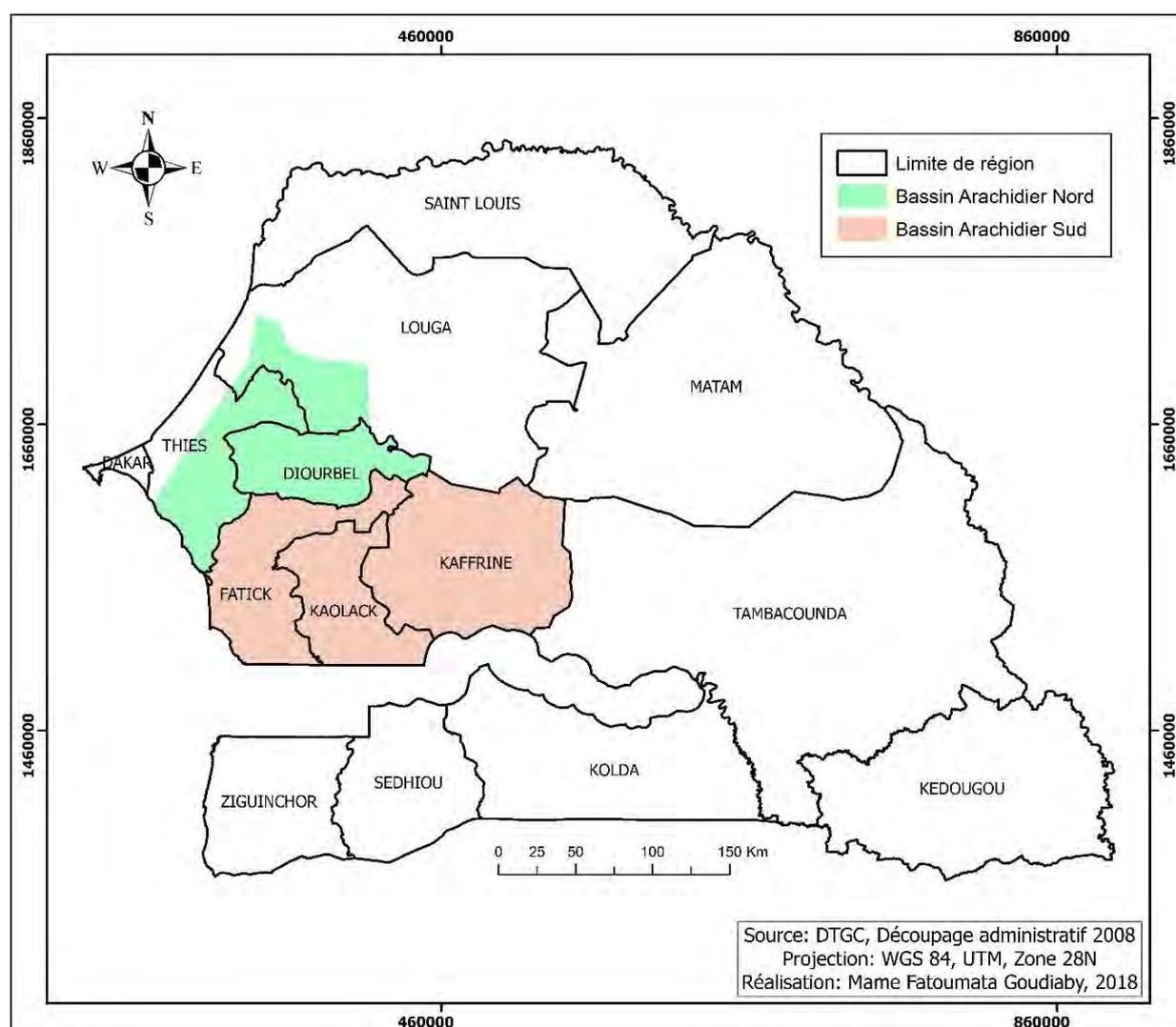


Figure 13: Carte de localisation du bassin arachidier du Sénégal

## **2.2. Caractéristiques climatiques**

La situation climatique du bassin arachidier est liée à un certain nombre de paramètres tels que le régime pluviométrique, les variations de températures et d'humidité relative, les vents etc. Le climat est marqué par deux saisons bien distinctes: une saison sèche de novembre à juin et une saison pluvieuse de juillet à octobre qui est souvent plus précoce et longue dans la partie sud (Fernande, 1999; Dione *et al.*, 2008; CSE, 2015; Khouma *et al.*, 2017).

### **2.2.1. Pluviométrie**

Le bassin arachidier est sous l'influence du climat sahélo-soudanien avec une pluviométrie annuelle comprise entre 400 - 600mm au nord et 700 - 900mm au sud (Fernandes, 1999; Khouma *et al.*, 2017). En ce qui concerne le sud du bassin arachidier, la pluviométrie enregistrée ces dernières années (saisons hivernales de 2012 à 2016) dans la région centrale a été marquée par une variabilité interannuelle et globalement distribuée autour de la moyenne annuelle de 800mm pour les saisons de 2012, 2013 et 2016 (Tableau 1). Une période de sécheresse a été observée pendant la saison de 2014 avec une pluviométrie globale faible de 587,7mm. Cette saison a été suivie d'une période humide pendant l'hivernage de 2015 où la pluviométrie a été importante (cumul de 1054mm) et assez bien répartie pendant toute la saison (Tableau 1). En outre, il a été noté un décalage du début de l'hivernage entre les mois de mai et juillet avec un démarrage des pluies plus tardives pendant les saisons de 2015 et 2016. Cette variabilité notée sur le début de l'hivernage mais aussi sur la fin qui est généralement survenue à la troisième semaine du mois d'octobre caractérise notamment la longueur de la saison dans cette partie du bassin arachidier principalement observée à moins de 4 mois ces dernières années (Tableau 1).

### **2.2.2. Température et humidité relative**

Dans le bassin arachidier, les températures moyennes oscillent entre 16 et 37°C avec une moyenne annuelle autour de 28°C. Par rapport à la variation de températures on peut distinguer trois périodes à savoir: une période sèche fraîche entre les mois de novembre et février où les températures sont relativement basses; une période sèche chaude entre les mois de mars et juin avec des températures nocturnes et journalières élevées associées à une humidité moyenne autour de 50% ; une période hivernale où les températures sont moyennement élevées autour de 30°C (Fernandes, 1999; Dione *et al.*, 2008; Khouma *et al.*, 2017). Dans le centre sud du bassin arachidier les températures moyennes ont été comprises principalement entre 25 et 32 °C pendant les périodes hivernales de 2012 à 2016 avec de légère variation d'une saison à l'autre. Cette période a été accompagnée d'une forte hygrométrie particulièrement entre les mois de juillet et septembre avec 70 - 85% d'humidité relative (Tableau 1).

**Tableau 1:** Pluviométrie, température et humidité relative enregistrées pendant les hivernages de 2012 à 2016 au centre Sud du bassin arachidier

Mois	Semaine	Année															
		2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2014	2015	2016	
		Pluviométrie moyenne (mm)					Températures moyennes (°C)					Humidité moyenne (%)					
Mai	S3	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	29,7	31,1	30,2	31,1	30,1	63,1	48,1	54,4	61,5	49,6	
	S4	0,0	15,1	0,0	0,0	0,0	30,9	32,1	31,8	31,9	27,4	55,9	58,5	50,9	42,6	80,3	
Juin	S1	0,0	5,4	13,8	0,0	0,0	31,2	29,8	31,1	30,4	28,9	57,6	64,3	60,8	53,2	75,0	
	S2	0,0	29,0	0,0	0,0	0,0	31,3	30,1	31,6	31,5	28,6	57,6	65,5	57,7	57,1	74,9	
	S3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,2	30,9	32,1	31,2	28,3	59,1	64,4	57,2	63,0	79,2	
	S4	48,5	49,1	0,0	1,7	0,0	29,7	30,0	31,6	31,2	28,0	69,8	62,1	58,9	60,5	81,2	
Juillet	S1	62,4	11,2	20,5	73,8	20,7	28,2	29,3	30,7	31,4	28,1	76,7	73,8	65,8	60,1	81,7	
	S2	55,7	19,9	19,8	35,1	2,0	28,4	28,6	31,1	28,8	27,5	73,6	72,8	62,7	75,8	81,8	
	S3	65,2	18,8	14,4	7,8	87,6	27,8	29,9	29,0	29,1	27,3	81,4	71,1	72,7	72,2	82,3	
	S4	83,9	11,5	0,8	35,7	129,5	27,9	29,7	30,4	28,5	27,8	78,2	73,5	73,6	75,5	79,7	
Août	S1	83,2	69,2	31,5	117,1	9,5	27,6	29,0	29,3	28,9	29,6	81,7	77,4	73,1	75,0	76,4	
	S2	49,1	80,9	46,9	61,9	20,5	27,5	27,4	27,7	28,0	29,7	83,3	82,3	74,9	80,8	73,8	
	S3	111,0	108,6	87,7	128,2	28,0	26,8	26,7	27,3	26,9	29,7	85,6	84,9	84,6	85,8	73,3	
	S4	103,0	188,0	71,2	56,8	268,9	27,2	27,0	27,8	27,7	29,8	83,8	83,5	81,9	80,2	67,3	
Septembre	S1	106,4	65,9	1,6	84,8	47,9	27,3	27,1	28,0	27,7	29,1	78,1	84,6	81,2	81,2	65,4	
	S2	0,0	48,3	98,1	145,0	161,0	28,5	28,3	28,3	27,4	28,0	80,4	80,9	77,5	82,8	58,9	
	S3	35,5	32,0	73,0	73,5	24,9	27,3	28,3	27,3	28,2	28,8	84,0	80,6	85,3	81,8	50,7	
	S4	53,9	36,7	40,3	39,0	80,4	27,8	29,0	28,0	27,8	28,4	82,8	79,3	84,4	82,2	47,3	
Octobre	S1	22,4	31,7	52,4	49,5	0,0	29,1	29,2	28,9	28,1	29,6	77,5	77,7	77,0	81,4	58,2	
	S2	0,0	3,5	1,9	31,6	0,0	28,9	29,0	29,5	29,2	29,7	78,3	75,6	69,8	77,1	51,8	
	S3	22,3	6,5	13,8	82,5	12,5	29,1	29,0	30,0	29,0	29,7	76,4	76,6	74,5	78,5	50,7	
	S4	0,0	2,8	0,0	0,0	1,0	30,1	28,9	29,9	28,9	29,8	71,6	70,5	68,4	79,5	42,9	
Novembre	S1	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	29,9	29,1	29,0	28,2	29,1	67,8	58,1	67,7	74,4	42,7	
	S2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,4	28,9	28,1	28,2	28,0	67,9	57,1	50,9	69,3	31,5	
	S3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,3	26,4	27,7	25,0	28,8	55,3	50,3	58,6	59,0	22,0	
	S4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,9	27,1	27,4	25,1	28,4	55,8	51,1	53,6	53,9	24,2	
<b>Cumul annuel</b>		902,5	834,1	587,7	1054,0	894,4	<b>Moyenne annuelle</b>	28,8	28,8	29,3	28,7	28,7	72,8	71,1	68,9	71,3	62,1

NB: Si= ième semaine (i=1, 2, . .,4).

### **2.2.3. Vents**

Les vents qui balayent le bassin arachidier sont l'alizé maritime qui souffle dans la zone côtière et l'alizé continental provenant de l'Est, l'harmattan provenant du Nord et la mousson qui vient du Sud. Les vents soufflent avec une vitesse moyenne de 1,5 - 2m/s dont les effets se manifestent par une érosion éolienne qui s'exprime souvent par de véritables vents de sables (Dione *et al.*, 2008).

### **2.3. Caractéristiques de l'agriculture**

Le bassin arachidier est une zone à vocation agricole qui représente près de 57% des terres arables du Sénégal. L'agriculture occupe 74% de la population de cette zone qui fournit l'essentiel de la production agricole pluviale du pays (CSE, 2007; Ngamb, 2016). Les principales spéculations sont l'arachide, les céréales (mil, sorgho, maïs et riz), le niébé, la pastèque, le manioc et le sésame. L'arachide occupe près de 48% des terres cultivées et est la principale culture de rente qui assure une bonne partie du revenu monétaire des paysans. Toutefois, les spéculations telles que le niébé, la pastèque et surtout le manioc contribuent aussi à l'augmentation des revenus (Dione *et al.*, 2008; ANSD, 2016). Le mil est la principale céréale cultivée essentiellement pour l'autoconsommation et couvre près de 64% des terres cultivées en céréales. Les résultats de la campagne agricole 2015/2016 présentent pour le mil, une production estimée à 749 874 t sur une superficie emblavée de 922 008 ha. Près de 78% de la production est dédiée au bassin arachidier pour 67% des emblavures. Néanmoins, la production du mil a été très variable ces dernières années avec une moyenne nationale estimée à environ 600 000 tonnes (ANSD, 2016).

D'autres activités telles que l'élevage, la pêche, l'aquaculture le commerce et l'artisanat se pratiquent également dans le bassin arachidier (CSE, 2007; Dione *et al.*, 2008).

## CHAPITRE 3

### **Abondance et Diversité des Insectes dans l'Agro-écosystème du Mil du Bassin Arachidier**

#### **Introduction**

Avec l'accroissement de la population et la pression foncière, la production agricole continue d'augmenter pour satisfaire la demande (Botha *et al.*, 2015). Il en résulte la réduction et la disparition de certaines espèces végétales et animales, engendrant ainsi une baisse des taxons qui en dépendent pour leur survie, y compris les insectes avec leur divers services écosystémiques (Duelli *et al.*, 1999; Abate *et al.*, 2000; Bianchi *et al.*, 2006). Actuellement, la préservation de ces services écosystémiques avec notamment certains insectes qui décomposent la matière organique, pollinisent ou attaquent les plantes ou qui jouent un rôle d'agent de régulation biologique animale ou végétale constitue un aspect important dans le maintien de l'équilibre des agro-écosystèmes (Altieri, 1999; Martina *et al.*, 2013; McCabe *et al.*, 2017).

Au Sahel, on a dénombré près de 300 espèces d'insectes nuisibles qui attaquent le mil en culture durant tout son développement (Risbec, 1950; Ndoye, 1979; Guèvremont, 1982; Gahukar *et al.*, 1986b; Ajayi, 1989). De nombreux ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes) sont associés à certains de ces insectes ravageurs (Risbec, 1960; Gahukar, 1981; Ndoye *et al.*, 1986; Nwanze et Harris, 1992). Cependant, la composition de ces différentes espèces pourrait avoir été altérée au cours des années du fait des changements discrets qui s'opèrent sur plusieurs années avec des impacts certains sur le fonctionnement des écosystèmes (Van Lenteren et Overholt, 1994). Cette altération du fonctionnement des écosystèmes peut être également induites par certaines pratiques culturales (Duelli *et al.*, 1999; Abate *et al.*, 2000; Horn, 2009). En outre, le changement climatique peut agir aussi directement sur la biodiversité avec l'augmentation de la température et la variation de la pluviométrie (Rosenzweig *et al.*, 2001; Mooney *et al.*, 2009; Bellard *et al.*, 2012).

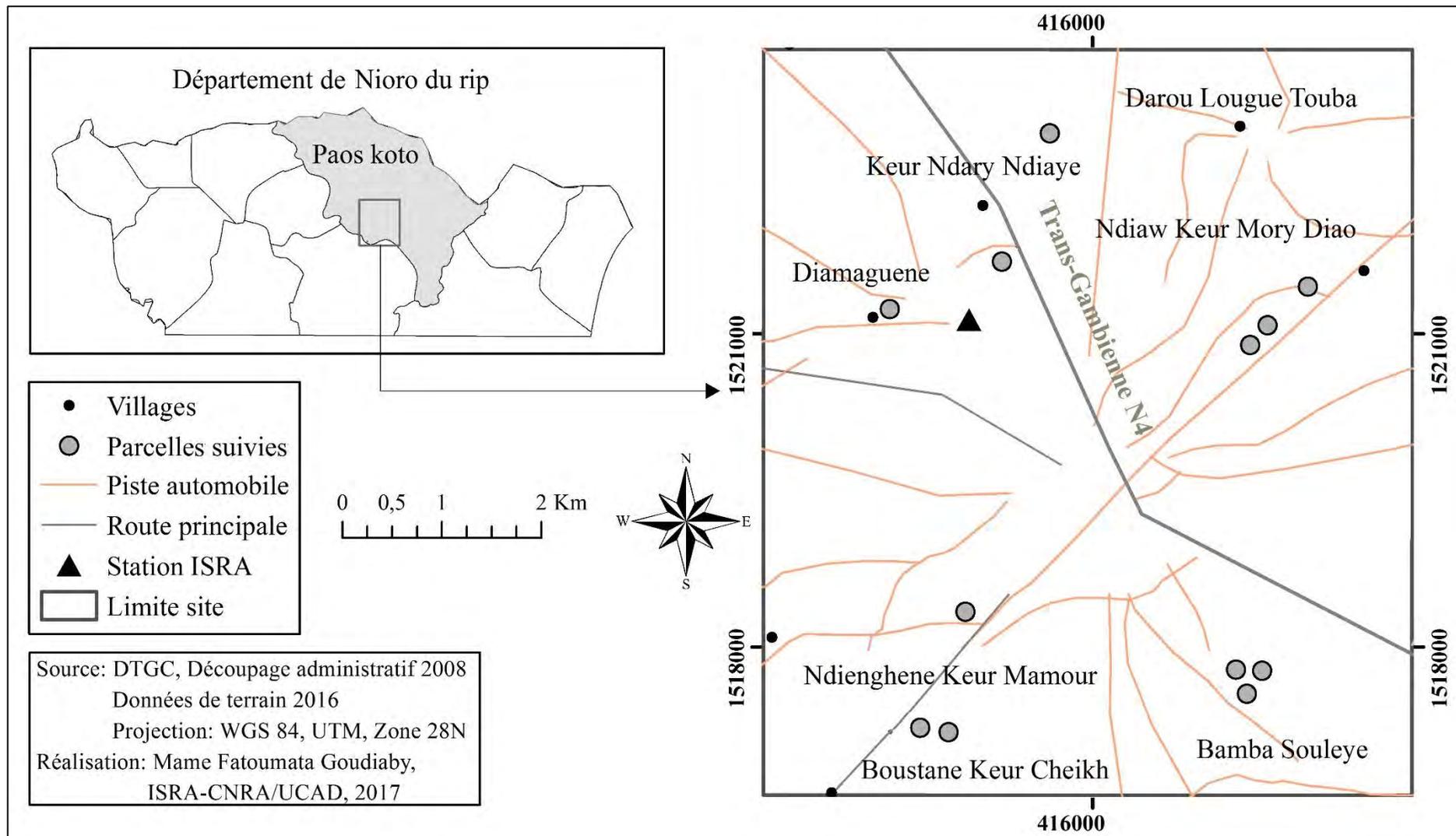
La connaissance de la biodiversité constitue un élément fondamental dans le développement des stratégies de gestion intégrée des ravageurs. Ainsi, la conservation des ennemis naturels d'un ravageur ou le renforcement de leur action de régulation par la promotion de pratiques limitant leur impacts négatifs sur la biodiversité et acceptables pour les producteurs est un aspect important de la lutte intégrée (Van Emden et Dabrowski, 1994; Gurr *et al.*, 2017). Par rapport à l'agro-écosystème du mil, une connaissance plus précise de la diversité des ravageurs et des ennemis naturels ainsi qu'une meilleure appréciation du fonctionnement de l'agro-écosystème avec la connaissance de la dynamique des populations et des causes sous-jacentes des changements de

densités des ravageurs, constitue une information clé pour la conception de stratégies de lutte durables (Van Lenteren et Overholt, 1994; Horn, 2009; Chaplin-Kramer *et al.*, 2011). Pour mieux connaître les insectes et comprendre la complexité de leurs interactions potentielles, il est important d'effectuer un inventaire des différentes espèces dans l'agro-écosystème du mil. Cette étude rentre dans ce cadre et vise à (i) déterminer l'abondance et la diversité des insectes rencontrés dans l'agro-écosystème du mil; (ii) déterminer les taxons et groupes d'insectes présents; (iii) déterminer la distribution des principaux insectes en fonction des stades phénologiques du mil.

### **3.1. Matériels et méthodes**

#### **3.1.1. Choix des parcelles**

Cette étude a été conduite au centre sud du bassin arachidier au cours de l'hivernage 2016. Des images satellitaires très hautes résolutions ont été utilisées pour réaliser la cartographie d'occupation des sols dans la zone avec un focus sur les parcelles agricoles. A cet effet le système d'information géographique a été utilisé avec les logiciels ENVI 4.5 et ArcGIS 10. A partir de la carte d'occupation du sol, un pixel de 400 km<sup>2</sup> (20\*20km) couvrant les zones administratives de Paoskoto, Taïba Niassène et Prokhane a été choisi. Parmi l'ensemble des points présents dans cet univers, 4 points ou villages ont été sélectionnés au hasard. Dans chacune des villages, 3 points ou parcelles de mil d'un hectare ou répétitions ont été choisies avec leurs coordonnées géographiques (Figure 14).



**Figure 14.** Carte de localisation des parcelles expérimentales de mil dans le centre sud du arachidier.

### 3.1.2. Piégeage et collecte des insectes

En général, recenser l'ensemble des individus d'une population dans un milieu ou habitat donné s'annonce difficile voire impossible. Il faut dès lors procéder au prélèvement d'une portion ou échantillon d'individus pour estimer la population grâce à des méthodes statistiques et des techniques appropriées (Southwood et Henderson, 2000). Dans l'étude de population d'insectes, l'ensemble des individus d'une population vivant dans un habitat donné constituent l'univers d'échantillonnage alors qu'une fraction de cet univers peuplée par un insecte cible représente une unité d'échantillonnage ou un échantillon (Pedigo et Buntin, 1994). Différents types d'échantillonnages sont souvent utilisés y compris l'échantillonnage aléatoire stratifié qui est l'un des plus puissants pour lequel une population  $N$  donnée est divisée en sous-populations appelées strates qui ne se chevauchent pas et qui ensemble, composent la population entière (Krebs, 1999; Moon et Wilson, 2009).

Dans cette étude, les formes adultes ont été ciblés afin d'évaluer leurs flux naturels dans les parcelles de mil guidés par les interactions plante hôte - insectes. Pour ce faire, les pièges attractifs tels que le piège lumineux n'ont pas été utilisés. En effet, le piège lumineux permet particulièrement de capturer les insectes nocturnes, néanmoins il présente des inconvénients tels que la surestimation de la population d'insectes présents localement dans un milieu donné mais aussi la capacité d'attirer des insectes qui viennent de loin et pas forcément associés à la culture. Ainsi, le piégeage des insectes dans les parcelles de mil a été réalisé à l'aide de filets fauchoir, de pièges enterrés, de pièges à colle jaune et de pièges malais (Figure 15). Les insectes volant ou sautant à la hauteur du mil ont été capturés au filet fauchoir (Figure 15 a). Cette méthode consistait à avancer sur une certaine distance en fauchant les plantes par de rapides mouvements latéraux de va-et-vient ( $180^\circ$ ) sur les lignes de la parcelle. Les pièges enterrés ont servi à capturer les insectes rampants. Ils étaient constitués de contenants de 20cm de diamètre et 20cm de profondeur remplis d'alcool (70%) au 1/3 de leur capacité puis placés dans des trous préalablement creusés (Figure 15 b). Pour la disposition des pièges, les parcelles ont été divisées en quatre strates égales. Dans chacune des strates trois (3) pièges ont été placés à une distance de 20m les uns des autres et à 15m des bordures de la parcelle. Les pièges à colle jaunes en plastique de 20x20cm ont été utilisés pour capturer les insectes attirés par les couleurs spécifiques (Figure 15 c). Les pièges ont été disposés selon le même procédé de stratification qui a été adopté pour les pièges enterrés. Au niveau de chaque strate, deux (2) pièges jaunes ont été placés au milieu des bordures externes à 50m des extrémités de la parcelle.

Quant aux pièges malais, ils ont été utilisés pour capturer les insectes volants à travers un dispositif sous forme de tente avec plusieurs pans de moustiquaire et un sommet incliné sur lequel un récipient en plastique contenant de l'alcool a été attaché à une extrémité. Les insectes qui butent sur les pans de la moustiquaire se trouvent piégés sous la partie inclinée qui les guide tout naturellement vers le récipient contenant l'alcool (Figure 15 d). Un seul piège malais a été placé au centre de chaque parcelle.



**Figure 15:** Equipements a) filet fauchoir, b) piège enterré, c) piège à colle jaune, d) piège malais utilisés pour l'échantillonnage des insectes dans les parcelles de mil.

Les piégeages ont eu lieu de la levée à la maturité du mil. Tous les stades phénologiques de la plante ont été échantillonnés toutes les semaines à la fréquence de deux relevés par semaine. Les insectes capturés avec les pièges malais, enterrés et le filet ont été mis dans des bocaux à formol (70°C) et ramenés au laboratoire avec les pièges à colle jaune pour un tri et une identification.

### 3.1.3. Identifications des insectes

Le classement des spécimens collectés dans les différents groupes taxonomiques ordre, famille, genre et espèce a été possible en utilisant la clé taxonomique de Roth 1980, la littérature disponible

(Risbec, 1950) mais également les collections d'insectes (Paratypes) de l'Institut Sénégalaise de la Recherche Agricole (ISRA) de Bambey et de la Direction de Protection des Végétaux (DPV). Une identification morphologique des spécimens a été effectuée sous microscope optique en particulier pour les parasitoïdes.

### 3.1.4. Estimation des variables

Un classement des insectes collectés a été effectué suivant le groupe fonctionnel en ravageurs, ennemis naturels et autres (détritivores, nécrophages, etc.). La classification des insectes en groupes fonctionnels a été basée sur les données de la littérature (Risbec, 1950; CABI, 2006; Powell, 2009). La communauté d'insectes ravageurs a été subdivisée selon les groupes taxonomiques en sous-communautés de coléoptères, lépidoptères, orthoptères et autres ravageurs regroupant les dermoptères, diptères et hémiptères. En ce qui concerne la communauté d'ennemis naturels, elle a été subdivisée en sous-communautés de prédateurs et parasitoïdes.

#### 3.1.4.1. Calcul de la diversité des insectes

Le niveau de diversité d'espèces dans les communautés d'insectes a été calculé à partir des indices de Shannon-Weaver et de Simpson (Michels Jr *et al.*, 2010; Ouali-N'Goran *et al.*, 2017).

L'indice de Shannon-Weaver a été calculé à l'aide de la formule (2.1):

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (2.1)$$

et l'indice de Simpson à partir de la formule (2.2):

$$D = \sum (P_i)^2 \quad (2.2)$$

où  $H$  = indice de biodiversité de Shannon-Weaver,  $D$  = indice de dominance de Simpson et

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (2.3)$$

où  $n$  est le nombre d'individus d'une espèce  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 92$ ) et  $N$  est le nombre total d'individus pour toutes les espèces prises ensemble.

#### 3.1.4.2. Calcul de la fréquence relative des insectes

La fréquence relative des différentes sous-communautés et des différentes espèces au sein des sous-communautés a été déterminée à l'aide de la formule (2.4):

$$F(\%) = \frac{ni}{N} * 100 \quad (2.4)$$

où  $n$  est le nombre d'individus dans une sous-communauté ou d'une espèce  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) et  $N$  est le nombre total d'individus dans une communauté ou sous-communauté.

### 3.1.4.3. Analyse des données

Les moyennes et écarts-types des indices de diversité de Shannon-Weaver, de dominance de Simpson, du nombre d'individus dans les différentes communautés et sous-communautés, de la densité des espèces ainsi que de la fréquence relative des différentes sous-communautés et espèces ont été calculés à l'aide du logiciel SAS 9.1 (SAS, 2003). L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée à l'aide de la procédure linéaire générale «GLM» et la comparaison des moyennes avec le test de Student Newman Keuls au seuil de probabilité  $\alpha=0,05$ . Pour éliminer l'hétéroscédasticité, les données de la fréquence relative ont été préalablement transformées en utilisant la formule  $\arcsine \sqrt{X + 1/2}$  tandis que les données des autres paramètres (indice de diversité, nombre d'individus et densité) ont été transformées grâce à la formule  $\log_{10}(X + 1)$  où  $X$  est la variable considérée (SAS, 2003; McDonald, 2009).

## 3.2. Résultats

### 3.2.1. Abondance et diversité des communautés d'insectes

Au total 60 080 insectes ont été collectés dans les parcelles de mil avec 92 espèces identifiées, appartenant à 32 familles et 7 ordres (ANNEXE 1). La communauté d'insectes autres que les ravageurs et ennemis naturels (Geotrupidae, Muscidae, Formicidae, Scarabaeidae) a été plus abondante avec un nombre moyen de  $206,24 \pm 0,03$  insectes/parcelle significativement élevé ( $F_{2,287} = 2,89$ ;  $P < 0,05$ ) comparativement aux ennemis naturels (Tableau 2). Les insectes ravageurs ont été moyennement abondants dans les parcelles (Tableau 2). En ce qui concerne la diversité, le calcul des indices de Shannon Weaver (H) et Simpson (C) a révélé une plus grande diversité dans la communauté des insectes ravageurs ( $H = 2,43 \pm 0,04$ ,  $F_{2,287} = 521,20$  ;  $P < 0,0001$  ;  $C = 0,13 \pm 0,01$ ;  $F_{2,287} = 370,95$ ;  $P < 0,0001$ ) suivi de celle des ennemis naturels (Tableau 2).

**Tableau 2:** Abondance et indices de diversité des communautés d'insectes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

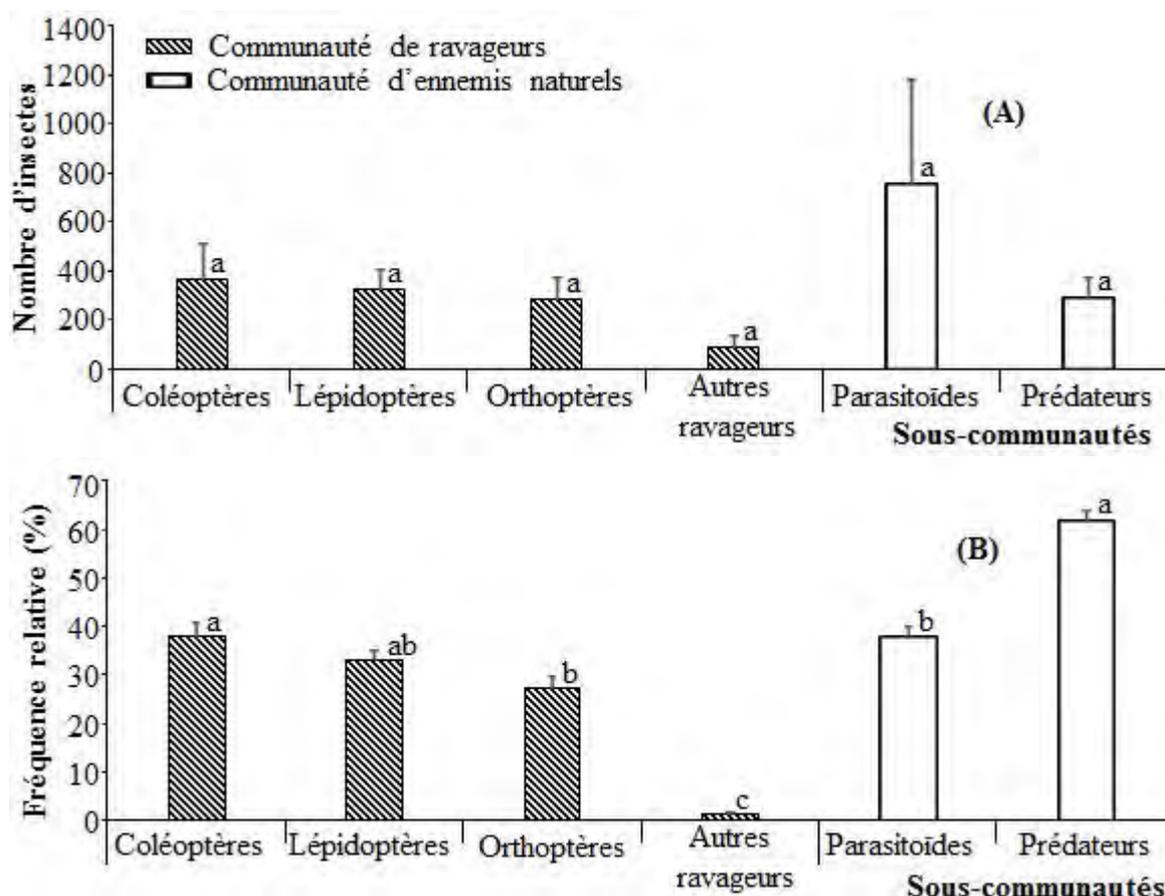
Communautés	No. Insectes	H	D
Ravageurs	$168,49 \pm 7,73ab$	$2,43 \pm 0,04a$	$0,13 \pm 0,01c$
Ennemis naturels	$146,14 \pm 6,26b$	$1,95 \pm 0,03b$	$0,19 \pm 0,01b$
Autres insectes	$206,24 \pm 0,03a$	$0,90 \pm 0,03c$	$0,47 \pm 0,01a$

**NB:** les données sont présentées sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type. Les moyennes avec les mêmes lettres dans la même colonne ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ). H= indice de diversité de Shannon-Weaver. D= indice de dominance de Simpson. Minimum de diversité dans les communautés ( $H=0$ ;  $D=1$ ); Maximum de diversité dans les communautés ( $H=5$ ;  $D=0$ )

### 3.2.2. Abondance et fréquence relative des différentes sous-communautés d'insectes

Dans la communauté des insectes ravageurs, le nombre d'insectes dans les différentes sous-communautés a varié en moyenne entre  $85 \pm 50$  et  $367 \pm 146$  individus sans aucune différence significative entre les sous-communautés. Il en est de même pour les ennemis naturels avec un nombre d'insectes compris entre  $293 \pm 83$  et  $758 \pm 419$  suivant les différentes sous-communautés (Figure 16 a).

La fréquence relative des sous-communautés a été significativement différente dans les deux communautés d'insectes (Figure 16 b). Parmi les insectes ravageurs, la sous-communauté des coléoptères a été plus fréquente ( $38,11 \pm 2,68\%$ ;  $F_{3,127} = 59,90$ ,  $P < 0,0001$ ) que celle des orthoptères. La sous-communauté de lépidoptères a été moyennement fréquente dans les parcelles de mil alors que le groupe des autres ravageurs représenté par les ordres de dermaptères, hémiptères et diptères a été moins rencontré ( $1,42 \pm 0,49\%$ ). Dans la communauté des ennemis naturels, malgré l'abondance apparente de la sous-communauté des parasitoïdes, elle a été moins fréquente ( $37,90 \pm 2,09\%$ ;  $F_{1,63} = 67,25$ ,  $P = 0,0001$ ) que la sous-communauté des prédateurs (Figure 16 b).



**Figure 16:** A) abondance et B) fréquence de distribution des différentes sous-communautés d'insectes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

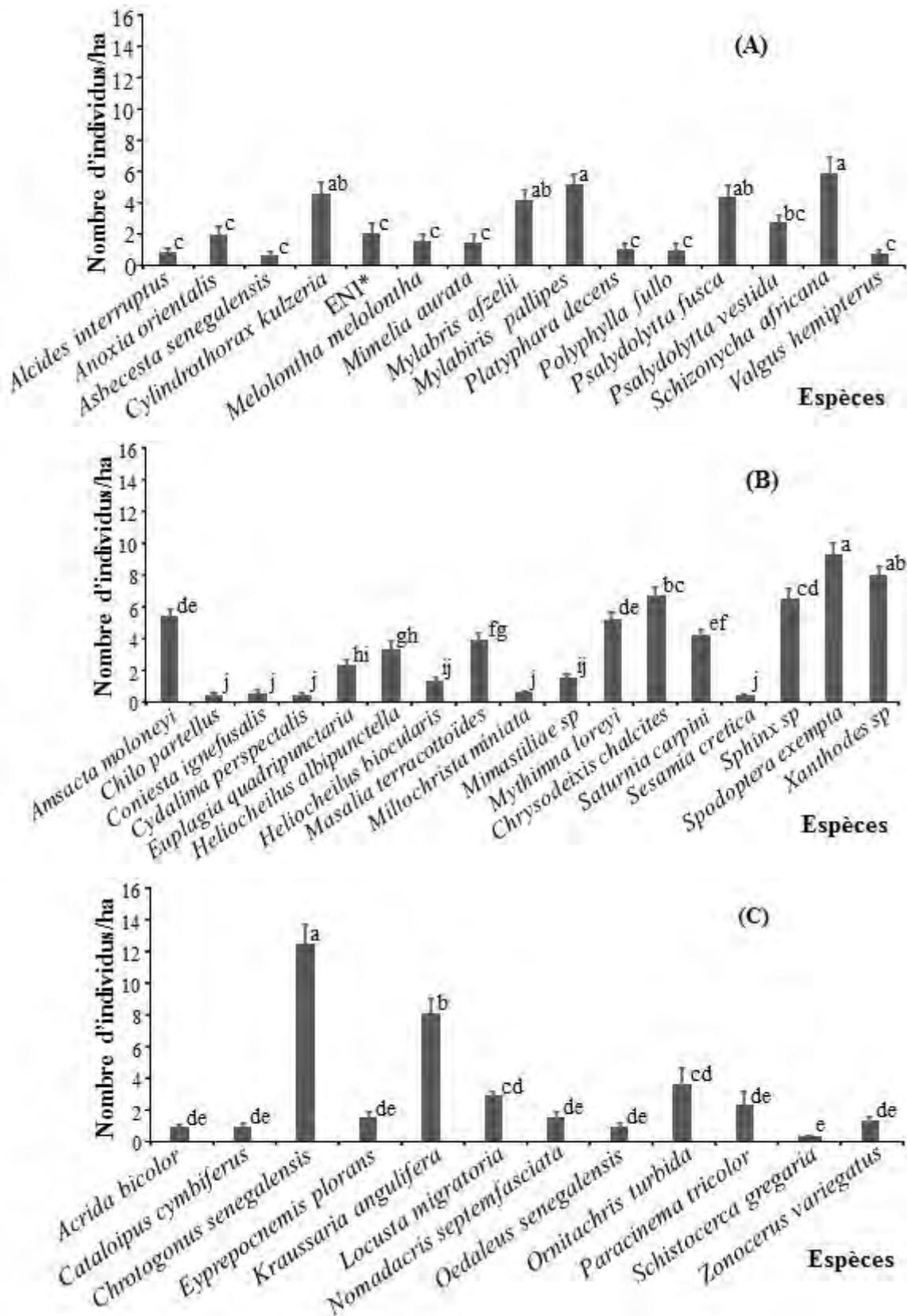
**NB:** Les données sont présentées sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type. Dans une même communauté, les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

### 3.2.3. Densité des espèces dans les différentes sous-communautés d'insectes ravageurs

Dans la sous-communauté des coléoptères ravageurs, 15 espèces ont été interceptées avec des densités moyennes qui ont varié entre moins d'un individu/ha et  $5,85 \pm 1,06$  individus/ha selon les espèces (Figure 17 a). Les espèces *Schyzonicha africana* et *M. pallipes* ont enregistré les densités les plus élevées ( $5,85 \pm 1,06 - 5,08 \pm 0,75$  individus/ha) suivies des espèces *Cylindrothorax kulzeria*, *Psalydollyta fusca*, *Mylabris afzelli* et *P. vestida*. La densité des individus a été significativement faible ( $0,66 \pm 0,19 - 2,00 \pm 0,71$  individus/ha;  $F_{14,1536} = 11,87$ ;  $P < 0,0001$ ) pour le reste des espèces de cette sous-communauté (Figure 17 a).

Concernant la sous-communauté des lépidoptères ravageurs, 17 espèces ont été rencontrées avec des densités variables. La densité des individus a été moins élevée ( $0,39 \pm 0,13 - 0,63 \pm 0,12$  individus/ha;  $F_{16,1631} = 56,32$ ,  $P < 0,0001$ ) pour les espèces *Coniesta ignefusalis*, *Chilo partellus*, *Sesamia cretica*, *Cydalima perspectalis* et *Miltochrista miniata* (Figure 17 b). Par contre, l'espèce *Spodoptera exempta* a enregistré la densité la plus élevée ( $9,29 \pm 0,73$  individus/ha) suivie de *Xanthodes sp* ( $7,53 \pm 0,60$  individus/ha), *Chrysodeixis chalcites* ( $6,71 \pm 0,51$  individus/ha), *Sphinx sp* ( $6,52 \pm 0,60$  individus/ha), *Mythimna loreyi* ( $5,38 \pm 0,54$  individus/ha), et *Amsacta moloneyi* ( $5,19 \pm 0,41$  individus/ha) (Figure 17 b). Une densité moyenne entre  $3,35 \pm 0,53 - 4,18 \pm 0,41$  individus/ha a été obtenue avec les espèces *Heliocheilus albipunctella*, *Masalia terracotoïdes* et *Saturnia carpini* (Figure 17 b).

Dans la sous-communauté des orthoptères, 12 espèces ont été capturées avec des densités moyennes comprises entre 0 et  $12,45 \pm 1,28$  individus /ha. Les espèces *Chrotogonus senegalensis* et *Kraussaria angulifera* ont enregistré une densité significativement élevée ( $12,45 \pm 1,28 - 8,02 \pm 1,04$  individus/ha ;  $F_{11,1152} = 46,60$  ;  $P < 0,0001$ ) par rapport aux autres espèces (Figure 17 c).



**Figure 17:** Densité moyenne (±écart-type) des différentes espèces de A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

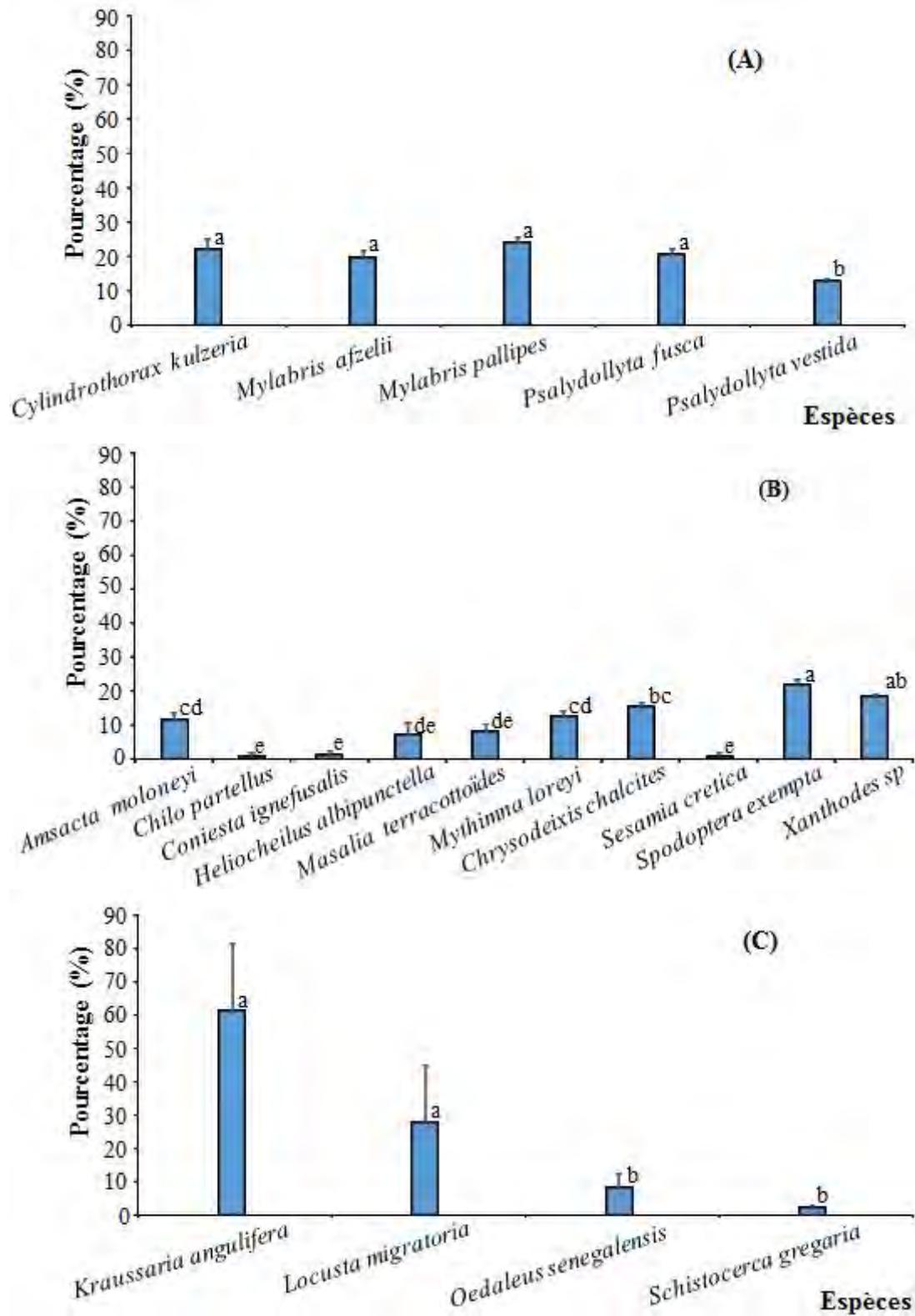
**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (P=0,05).

### 3.2.4. Fréquence des principaux insectes ravageurs

La fréquence relative de 5 espèces de coléoptères, 10 espèces de lépidoptères et 4 espèces d'orthoptères est présentée sur la figure 18. L'espèce *M. pallipes* a été le coléoptère le plus fréquent représentant  $24,31 \pm 1,27\%$  suivie de *C. kulzeria*, *M. afzelli* et *P. fusca*. Aucune différence significative n'a été notée pour la fréquence de ces différentes espèces. Par contre, *P. vestida* a été significativement moins fréquente ( $12,75 \pm 0,72\%$ ;  $F_{4,14} = 5,42$ ;  $P < 0,05$ ) dans les parcelles de mil (Figure 18 a).

Parmi les lépidoptères, les espèces *S. exempta*, *Xanthodes sp.*, *C. chalcites*, *M. loreyi* et *A. moloneyi* ont été plus fréquent ( $11,87 \pm 1,92 - 22,19 \pm 1,31\%$ ;  $F_{9,29} = 20,46$ ;  $P < 0,0001$ ) comparativement à *Coniesta ignefusalis*, *Chilo partellus*, *Sesamia cretica* très faiblement représentées dans les parcelles ( $0,90 \pm 0,90 - 1,31 \pm 1,31\%$  des individus). La fréquence relative a été également assez faible ( $7,22 \pm 3,36 - 8,12 \pm 2,21\%$  des individus) pour les espèces *H. albipunctella* et *M. terracotoïdes* (Figure 18 b).

En ce qui concerne les principaux orthoptères, les espèces *K. angulifera* et *L. migratoria* ont été significativement plus fréquentes ( $F_{3,11} = 11,61$ ;  $P < 0,0001$ ) avec  $61,31 \pm 20,33\%$  et  $28,04 \pm 17,01$  respectivement en comparaison à *O. senegalensis* et *S. gregaria* (Figure 18 c).

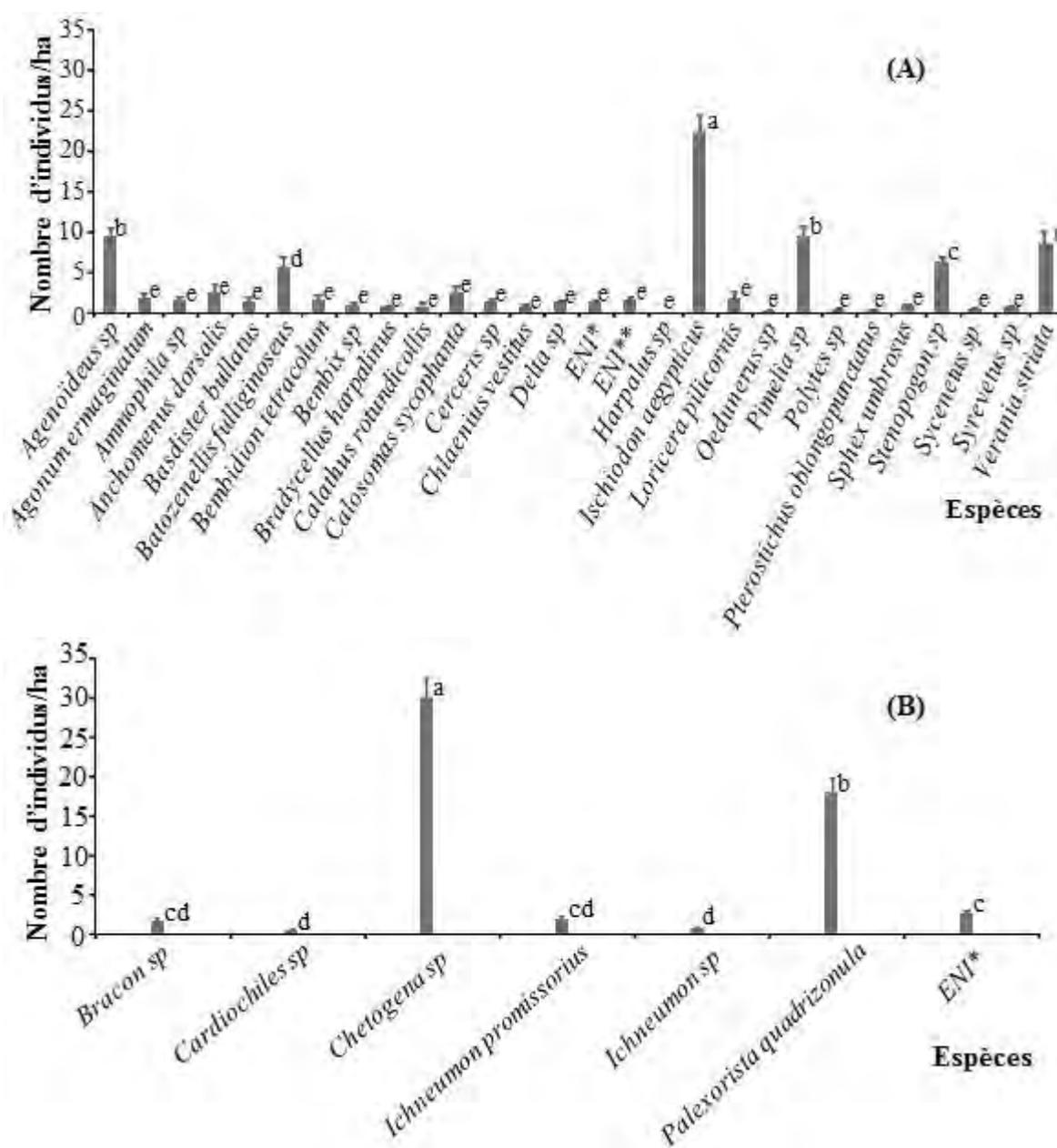


**Figure 18:** Fréquence de distribution des principaux A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

**NB:** Les données sont présentées sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type. Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

### 3.2.5. Densité des espèces dans les différentes sous-communautés d'ennemis naturels

En ce qui concerne les prédateurs, *Ischiodon aegypticus* a enregistré une densité significativement élevée ( $F_{27,2688} = 54,42$ ;  $P < 0,0001$ ) avec  $22,5 \pm 1,93$  individus/ha. *Pimelia sp* et *Agenoideus sp* ont enregistré des densités moyennes suivis de *Verania striata*, *Stenopogon sp* et *Batozenellus fulliginosus*. La densité a été plus faible ( $0,04 \pm 0,03 - 2,58 \pm 0,81$  individus/ha) pour les autres espèces capturées (Figure 19 a). Quant aux parasitoïdes, *Palexorista quadrizonula* et *Chetogena sp* ont enregistré les plus grandes densités ( $18,05 \pm 1,80 - 29,95 \pm 2,56$  individus/ha;  $F_{6,672} = 142,79$ ;  $P < 0,0001$ ) comparativement aux autres espèces (Figure 19 b).



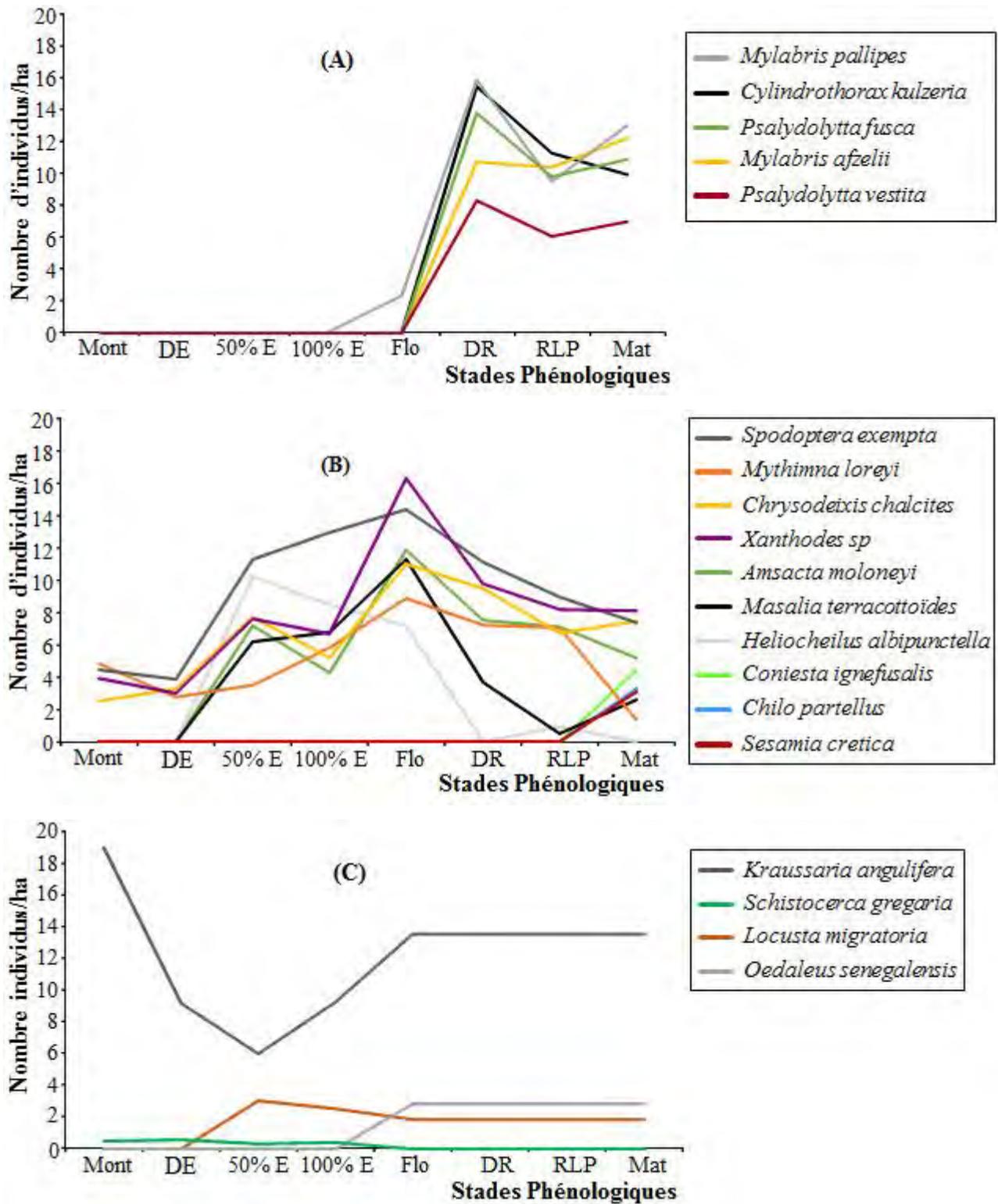
**Figure 19:** Densité moyenne ( $\pm$ écart-type) des différentes espèces de A) prédateurs et B) parasitoïdes dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

### 3.2.6. Dynamique de population des principaux insectes ravageurs en fonction des stades phénologiques du mil

Les principaux coléoptères ravageurs ont été interceptés entre la phase de développement de la panicule et la phase de remplissage des grains (Figure 20 a). Excepté pour *M. pallipes* dont les premières apparitions ont été notées vers la fin de l'épiaison, *C. kulzeria*, *P. fusca*, *M. afzelii* et *P. vestida* ont été rencontrés à partir du stade de floraison. Pour l'ensemble des espèces, le pic des populations a eu lieu au début du remplissage des grains (Figure 20 a).

Concernant les principaux lépidoptères, la dynamique des populations des différentes espèces a permis de classer les insectes en 3 groupes (Figure 20 b). Le premier groupe est constitué de *S. exempta*, *M. loreyi*, *C. chalcites*, *Xanthodes sp* et *A. moloneyi* qui sont observés entre le stade de montaison et de maturation des grains. Pour ces espèces les pics de captures ont eu lieu au stade 50% épiaison et à la floraison du mil. Le deuxième groupe est constitué de *H. albipunctella* et *M. terracotoïdes* qui sont observés entre le début de l'épiaison et le stade de maturation des grains. Le pic de populations de *M. terracotoïdes* a eu lieu au stade de floraison et celui de *H. albipunctella* aux stades 50% épiaison puis au stade de remplissage laiteux-pâteux des grains (Figure 20 b). Le troisième groupe a été constitué par *C. partellus*, *S. cretica* et *C. ignefusalis* dont les individus n'ont été interceptés qu'à partir du stade de remplissage laiteux-pâteux des grains (Figure 20 b). Pour les principales espèces d'orthoptères, les fluctuations de la population de *K. angulifera*, ont été notées à tous les stades de développement du mil avec le pic des captures obtenus au cours de la montaison (Figure 20 c). *S. gregaria* a été capturée entre la montaison et la fin de l'épiaison. Les premières captures de *L. migratoria* ont eu lieu au début de l'épiaison et le pic de population a été obtenu au stade 50% épiaison. Les fluctuations de la population de *O. senegalensis* ont eu lieu de la fin de l'épiaison au stade de maturation avec le pic de population obtenu au stade de floraison (Figure 20 c).

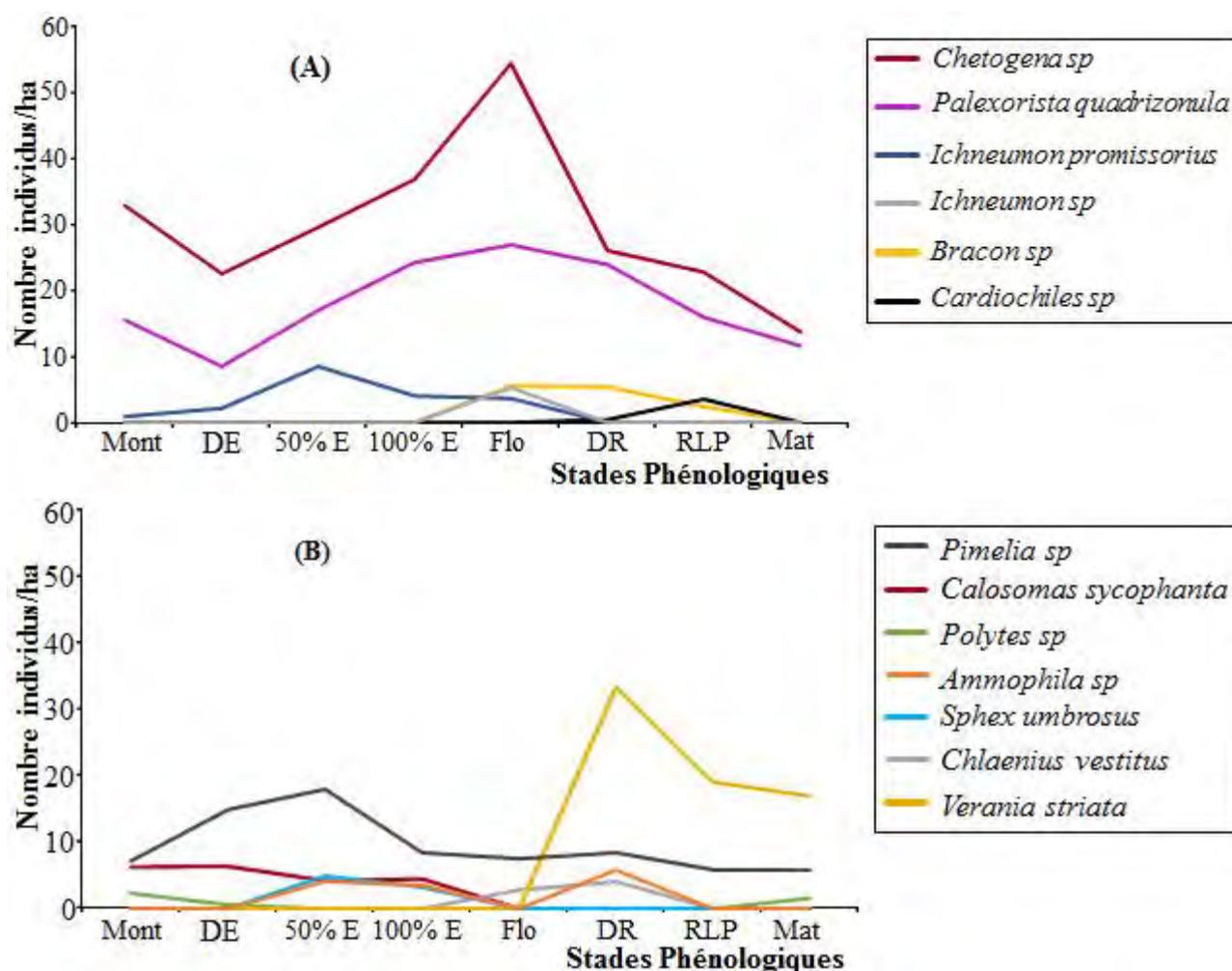


**Figure 20:** Dynamique de population des principaux A) Coléoptères, B) Lépidoptères et C) Orthoptères ravageurs en fonction de la phénologie du mil au centre sud du bassin arachidier.

NB: Mont= montaison; DE= début épiaison; E= épiaison; Flo= floraison; DR= début remplissage; RLP= remplissage laiteux-pâteux; Mat=maturation.

### 3.2.7. Dynamique de population des ennemis naturels en fonction des stades phénologiques du mil

Parmi les ennemis naturels capturés dans les parcelles de mil, 6 principales espèces de parasitoïdes et 7 espèces de prédateurs ont été répertoriées (Figure 21). Pour les parasitoïdes, à l'exception d'*Ichneumon sp*, toutes les espèces ont atteint leur pic de populations au stade de floraison du mil (Figure 21 a). Quant aux prédateurs, les pics de captures de *Pimelia sp*, *C. sycophanta* et *S. umbrosus* ont été obtenus au stade 50% épiaison alors que le maximum d'individus a été capturé pendant le stade de remplissage des grains pour *V. striata* et *C. vestitus*. L'espèce *Polytes sp* n'a été capturée qu'entre les stades de montaison - 50% épiaison et de remplissage laiteux-pâteux - maturation avec le maximum d'individus capturés à la montaison et à la maturation. *Ammophila sp* a été capturée entre l'épiaison et la maturation des grains avec le pic des captures obtenu à 50% épiaison et au début du remplissage des grains de mil (Figure 21).



**Figure 21:** Dynamique de population des A) parasitoïdes et B) prédateurs associés aux principaux insectes ravageurs en fonction de la phénologie du mil au centre sud du bassin arachidier.

**NB:** Mont= montaison; DE= début épiaison; E= épiaison; Flo= floraison; DR= début remplissage; RLP= remplissage laiteux-pâteux; Mat=maturation

### 3.3. Discussion

Globalement, pendant cette étude, 92 espèces d'insectes réparties dans 32 familles et 7 ordres ont été rencontrées dans l'agroécosystème du mil. Le grand nombre d'espèces de coléoptères, hyménoptères et lépidoptères identifiés se rapporte aux observations de certains auteurs selon qui, les coléoptères constitue le groupe taxonomique le plus diversifié suivi de celui des hyménoptères, lépidoptères et diptères (McHugh et Liebherr 2009; Quicke, 2009).

En ce qui concerne les communautés d'insectes rencontrées, elles ont renfermé une diversité variable qui pourrait s'expliquer par la structure de l'agroécosystème, la présence ou la quasi absence de végétation à côté des parcelles pouvant servir de refuge à certaines espèces (Rango, 2005; Botha *et al.*, 2015). Dans le cas particulier des insectes ravageurs rencontrés dans les parcelles de mil, l'abondance relativement élevée des individus serait probablement liée à une émergence des adultes ou population résiduelle qui s'est faite localement ou sur les autres systèmes de cultures de la saison précédente en plus des immigrations possibles dans les parcelles. En fait, les captures effectuées concernent les adultes d'insectes qui sont déjà présents dans l'agrosystème ou bien attirés par un complexe de volatiles végétaux ou entomologiques (Wonorahardjo *et al.*, 2018). Cela pourrait également être à l'origine d'une immigration des ennemis naturels en provenance des zones éloignées moins anthropisées ou des greniers à côté des habitations pour certains. Selon de nombreux auteurs, les écosystèmes complexes avec une proportion élevée d'habitat semi naturels contribuent généralement à l'augmentation de la diversité des ennemis naturels en fournissant entre autres des refuges, des hôtes alternatifs, de la nourriture etc. et par conséquent au renforcement de la fonction de régulation (Duelli *et al.*, 1999; Zhao *et al.*, 2013; Balzan *et al.*, 2015; Perez-Alvarez *et al.*, 2018; Soti *et al.*, 2019). En outre, la communauté des insectes ravageurs a été également assez diversifiée avec 47 espèces identifiées. La plupart de ces espèces ont été rencontrées dans de précédentes études sur le mil avec 84 espèces de ravageurs répertoriées au Niger et 81 au Sénégal (Ndoye, 1979; Guèvremont, 1982; Gahukar *et al.*, 1986b). Par ailleurs, les résultats obtenus sur l'importance des espèces de coléoptères, lépidoptères et orthoptères sont confortés par Mbaye (1993) selon qui, les principaux insectes ravageurs du mil appartiennent en général aux ordres de coléoptères, lépidoptères, diptères et parfois d'orthoptères. Parmi les espèces de ravageurs rencontrées, l'abondance élevée des hannetons notamment *S. africana* doit avoir des relations avec le système de rotation culturale en arachide - mil prédominant dans le bassin arachidier. Ces espèces de Scarabaeidae sont généralement inféodées à la culture de l'arachide (Risbec, 1950). Les adultes pondent leurs œufs au niveau des résidus végétaux et matières organiques en décomposition. A l'éclosion, les larves fouinent dans le sol en creusant des galeries et en rongant les racines des plantes des parcelles infestées. Ce qui se traduit en général

par la mortalité des cultures sur des plages de superficie importante selon le niveau d'infestation (Ansari *et al.*, 2006; Bhawane, 2011). Pour les Meloidea ravageurs, les genres Psalydollyta, Mylabris et Cylindrothorax ont été abondants au stade de remplissage des grains. Ces résultats concordent avec ceux de Goudiaby (2012) mais s'opposent aux observations faites dans d'autres études où l'abondance des Meloidea coïncidait avec les stades d'épiaison et de floraison du mil (Guèvremont, 1982; Gahukar, 1984; Ndoye *et al.*, 1986; Baldé 1993). En fait pour ces espèces, leur apparition se fait souvent tout au long du cycle du mil avec des pics de population qui se retrouvent en période de floraison - remplissage des grains nécessitant parfois des interventions pour éviter des dégâts importants dans certaines zones (Baldé, 1993). L'abondance des insectes phyllophages notamment *S. exempta*, *Xanthodes sp.*, *M. loreyi* et *A. moloneyi* au début de l'épiaison jusqu'à la floraison ne semble pas suivre l'occurrence généralement observée de ces espèces qui apparaissent le plus souvent avec une population assez élevée pendant la phase végétative de la culture étant donné que cela correspond à la phénologie favorable pour la ponte et le développement des larves (Gahukar, 1984; Ndoye, 1988; Kalaisekar et Padmaja, 2017). Les captures effectuées dans les pièges pourraient ainsi correspondre à une seconde génération de ces ravageurs venus des parcelles environnantes dont le semis a été beaucoup plus précoce que dans les parcelles d'expérimentation. Pour les foreurs de tiges, ils sont généralement rencontrés pendant tout le cycle de développement du mil avec plusieurs générations possibles en fonction des conditions du milieu (Bal, 1988b; Youm et Gilstrap, 1993b; Drame-Yaye *et al.*, 2003). Ainsi, la population capturée pendant le stade de remplissage des grains pourrait correspondre d'une part à la capture d'une seule génération liée à la configuration de l'hivernage où des pauses pluviométriques ont dû conduire à un retard d'émergence des adultes. D'autre part cela pourrait correspondre à une seconde génération des foreurs beaucoup plus importante que la première génération ayant émergée après l'installation des pluies d'où l'absence de captures pendant la phase végétative du mil. Contrairement à *C. ignefusalis* qui est plus spécialisée sur le mil, *C. partellus* et *S. cretica* sont plus retrouvées sur le sorgho et le maïs (Youm *et al.*, 1996; Kfir *et al.*, 2002; Kalaisekar et Padmaja, 2017). L'émergence des mineuses de l'épi du mil, *M. terracotoïdes* et *H. albipunctella* correspond au début de l'épiaison jusqu'au remplissage des grains de mil (Ndoye, 1988; Goudiaby, 2012). Cette période coïncide avec la présence d'une très grande proportion d'épis favorables à la ponte mais également à l'émission maximum de volatiles de la plante attractifs pour les femelles (Wonorahardjo *et al.*, 2018). Toutefois, en ce qui concerne *H. albipunctella*, il est remarquable une petite proportion d'individus capturés en fin de cycle du mil qui, au-delà d'une deuxième génération, constituent un niveau d'émergence retardé d'une même cohorte en diapause compte tenu de la distribution des pluies pendant l'hivernage 2016 (Ndoye

,1988; Nwanze et Sivakumar, 1990; Youm et Gilstrap,1993b). La présence des espèces forestières *Euplagia quadripunctaria*, *Miltochrista miniata*, *Saturnia carpini*, *Mimastiliae sp*, et *Sphinx sp* qui ont été déjà observées dans l'agrosystème du mil sans pour autant être mentionnées dans la littérature pourrait s'expliquer par l'existence des parcs agroforestiers où dominant les espèces *Cordyla pinnata*, *Faidherbia albida*, *Combretum aculeatum*, *Piliostigma reticulatum*. Pour la plupart des Acrididae notamment *O. senegalensis*, les populations étaient faibles en nombre au stade de développement végétatif voire reproductif à l'image des autres études conduites sur le mil (Ndoye *et al.*, 1986; Nwanze et Harris, 1992; Bal *et al.*, 2015). La faible abondance des espèces en particuliers la réduction de la population de *K. angulifera* au début de l'hivernage pourrait être dû au vieillissement des populations persistantes dans le milieu toute l'année mais aussi aux facteurs de mortalité comme la pluviométrie et la prédation par les oiseaux et autres (Colvin et Holt, 1996). Après les premières pluies, les oothèques déposés en général dans le sol sous les arbres et arbustes, dans les jachères, les précédents culturaux en arachide ou mil éclosent pour se déplacer massivement de préférence vers les parcelles de mil (Popov *et al.*, 1990; Maïga, 2008). Plus d'une trentaine espèces d'auxiliaires d'insectes ont été rencontrés lors des tris des captures des pièges. Ils s'agit essentiellement de parasitoïdes et prédateurs généralistes associés aux ravageurs du mil (Gahukar *et al.*, 1986b; CABI, 2006; Sow *et al.*, 2018). Les populations élevées de *P. quadrizonula* et *I. promissorius* au début des captures pendant la phase végétative du mil pourraient provenir de populations déjà existantes dans l'agrosystème étant donné que ces espèces sont des endoparasitoïdes larvo-nymphal de plusieurs autres espèces de lépidoptères non spécialisées sur mil (Gahukar, 1981; CABI, 2006). L'abondance des parasitoïdes et des prédateurs tels que *Ammophila sp*, *Polytes sp* et *Sphex umbrosus* dans les captures à partir du stade végétatif jusqu'au stade de remplissage des grains pourrait être liée à la disponibilité de la nourriture pendant cette période. En effet, cette période a coïncidé avec la présence des sauteriaux dans le milieu mais également des larves de lépidoptères phyllophages, mineuses de l'épi et foreurs de tiges dans les parcelles de mil dont l'alimentation sur les différentes parties de la plante a dû induire la libération de substances volatiles qui ont attiré ces ennemis naturels (Cuevas-Reyes, 2007; Rodriguez-Saona, 2011). Dans l'agrosystème du mil, les larves de *H. albipunctella* sont généralement parasitées par les espèces *Cardiochiles* (= *Schoelandella*) *sahelensis*, *Palexorista quadrizonula* et le genre Bracon qui est également retrouvé chez les foreurs de tiges notamment *C. ignefusalis* (Gahukar, 1981; Ndoye, 1991; CABI, 2006; Sow *et al.*, 2018). Les genres *Palexorista* et *Chetogena* parasitent également les espèces *A. moloneyi* et *Spodoptera spp*. En outre, le genre *Spodoptera* est souvent associé au parasitoïde *I. promissorius* (Ndoye, 19179; CABI, 2006). En ce qui concerne les hyménoptères prédateurs qui sont généralement des polyphages, en particulier, l'espèce

*Polytes sp* constitue un prédateur des larves de *H. albipunctella* mais également des genres Spodoptera et Mythimna (Gahukar *et al.*, 1986b; Ndoye 1991). Par ailleurs, l'espèce *Sphex umbrosus* s'attaque généralement aux sauteriaux (CABI, 2006) lesquels ont présenté une distribution dans l'agrosystème qui suit la même tendance que celle des espèces *Pimelia sp*, *C. sycophanta* et *C. vestitus*. Ce qui semble normale car ces espèces consomment le plus souvent les oothèques de sauteriaux déposées dans le sol (Greathead *et al.*, 1994). En dépit de l'abondance relativement élevée des insectes ravageurs comparativement aux ennemis naturels, ces derniers semblent les réguler et permettre un équilibre dans cet agrosystème caractérisé par une co-évolution stable de population dans le temps (Rana *et al.*, 2017).

Au cours de cette étude, d'autres ravageurs répertoriés dans de nombreuses études tels que les espèces de lépidoptères *S. calamistis*, *B. fusca*, *E. saccharina*, *Masalia nubila*, *Helicoverpa armigera*, *Pyroderces sp*, le criocère *Lema planifrons*, la cécidomyie *Geromia penniseti*, les punaises notamment *Dysdercus spp* et les Scarabeidae *Rhinyptia infusata*, *Pachnoda spp* n'ont pas été interceptées dans les pièges (Ndoye, 1979; Guèvremont, 1982; Gahukar *et al.*, 1986b; Nwanzé et Harris 1992; Harris et Youm 2000; Goudiaby, 2012; Sow *et al.*, 2018). Certains prédateurs et parasitoïdes également très communs à l'agrosystème du mil n'ont pas été rencontrés. La méthode de suivi des insectes adoptée pendant ces études notamment le système de piégeage utilisé, les observations directes sur les plantes mais également les stades cibles de la culture et des insectes pourrait certainement expliquer cette différence avec nos résultats. En effet, dans le même agrosystème, nos résultats s'opposent à ceux de Sow *et al.*, (2018) qui ont conduit une étude similaire en procédant à un suivi des œufs et des larves des insectes de l'épi mais également à des observations directes sur les plantes. D'autres part, dans la plupart des études sur l'inventaire des insectes du mil, le piège lumineux a été principalement utilisé (Ndoye, 1979; Guèvremont, 1982; Gahukar *et al.*, 1986b). Selon certains auteurs, la capture des insectes peut être influencée par le type de piège (Jocque *et al.*, 2016; Metspalu *et al.*, 2015; Pinto-Zevallos & Vänninena, 2013). Aussi, il est probable que l'extension de cette culture sur plusieurs milliers d'hectares, le retard observé dernièrement sur l'installation des pluies en plus des périodes de sécheresse enregistrées au cours des saisons, mais également les variations de températures n'ont pas été sans effet sur le développement de certaines espèces.

## **Conclusion**

Cette étude a ressorti une grande diversité d'insectes dans l'agrosystème du mil au niveau du bassin arachidier avec 92 espèces identifiées et réparties dans 32 familles et 7 ordres. Les coléoptères, hyménoptères et lépidoptères ont été les groupes taxonomiques qui ont renfermé la plupart des

espèces. Parmi les communautés d'insectes rencontrées, les ravageurs ont été particulièrement abondants et diversifiés que les ennemis naturels. En ce qui concerne ces insectes ravageurs, les meloidae, *M. pallipes*, *C. kulzeria*, *P. fusca*, *M. afzelli* ainsi que les espèces phyllophages telles que *S. exempta*, *Xanthodes sp*, *C. chalcites*, *A. moloneyi*, *M. loreyi* ont été plus fréquents sur le mil. *K. angulifera* et *L. migratoria* ont été également assez fréquents de même que les espèces *H. albipunctella* et *M. terracotoïdes*. Le niveau des populations de *C. ignefusalis*, *C. partellus*, *S. cretica*, *O. senegalensis* et *S. gregaria* a été relativement faible pendant cette étude. Quant aux ennemis naturels, les parasitoïdes et prédateurs rencontrés sont pour la plupart des espèces généralistes communément retrouvées dans les agro-écosystèmes sahéliens. Cependant, les populations d'insectes ravageurs et d'ennemis naturels capturés n'ont pas été très importantes compte tenu du nombre d'individus obtenu à l'hectare très faible dans l'agro-écosystème. Il a été également noté une synchronisation entre les fluctuations des insectes ravageurs et leurs ennemis naturels en fonction de la phénologie du mil. Aussi, les fluctuations des insectes dans l'agrosystème du mil pourraient probablement être liées à la répartition spatio-temporelle de la pluviométrie pendant la période d'étude.

## CHAPITRE 4

### **Impact de la Mineuse de l'Épi et des Foreurs de Tiges sur le Mil et Importance de leur Régulation par les Parasitoïdes dans le Bassin Arachidier**

#### **Introduction**

Après la sécheresse des années 1970, les insectes ravageurs tels que la chenille mineuse de l'épi, *H. albipunctella* (Vercambre, 1978; Gahukar, 1984; Ndoye, 1991) et les foreurs de tiges y compris *C. ignefusalis* (Nwanze et Harris, 1992) ont été signalés comme étant les principales espèces d'importance responsables parfois de dégâts considérables sur la culture du mil. Ces espèces sont très largement réparties au Sahel (Gahukar, 1984) et occasionnent des pertes quantitatives et qualitatives sur la culture du mil (Nwanze et Sivakumar, 1990; Youm *et al.*, 1996). *H. albipunctella* cause des dégâts caractéristiques sur l'épi de mil (Ndoye, 1991). Tandis que les foreurs de tiges constituent un complexe (Harris et Youm, 2000) et causent différents types de dégâts selon le stade phénologique du mil et de la génération des larves infestantes (Youm *et al.*, 1996; Singh *et al.*, 2012). Les ennemis naturels de la mineuse de l'épi et des foreurs de tiges incluent les parasitoïdes des larves qui ont été très largement étudiés en Afrique et qui jouent un rôle très important dans le maintien de l'équilibre naturel des agro-écosystèmes (Gahukar, 1981; Hordzi et Botchey, 2012; Tounou *et al.*, 2013).

Avec les changements climatiques notés au cours de ces dernières années particulièrement, le retard et l'irrégularité de la pluviométrie, la situation de ces ravageurs ainsi que l'action de leurs parasitoïdes pourraient être influencées comme cela s'est produit dans le passé avec les ravageurs du mil et des autres céréales (Harris, 1995; Khouma *et al.*, 2017). Par ailleurs, à cela s'ajoutent les pratiques culturales souvent inappropriées des producteurs qui peuvent également avoir un effet sur la bio-écologie des insectes dans l'agro-écosystème du mil. En effet, des bonnes pratiques agronomiques résultent une modification de l'agro-écosystème pouvant le rendre moins favorable pour les insectes ravageurs et/ou plus favorable pour leurs ennemis naturels (Kumar, 1991; Van Den Berg *et al.*, 2000).

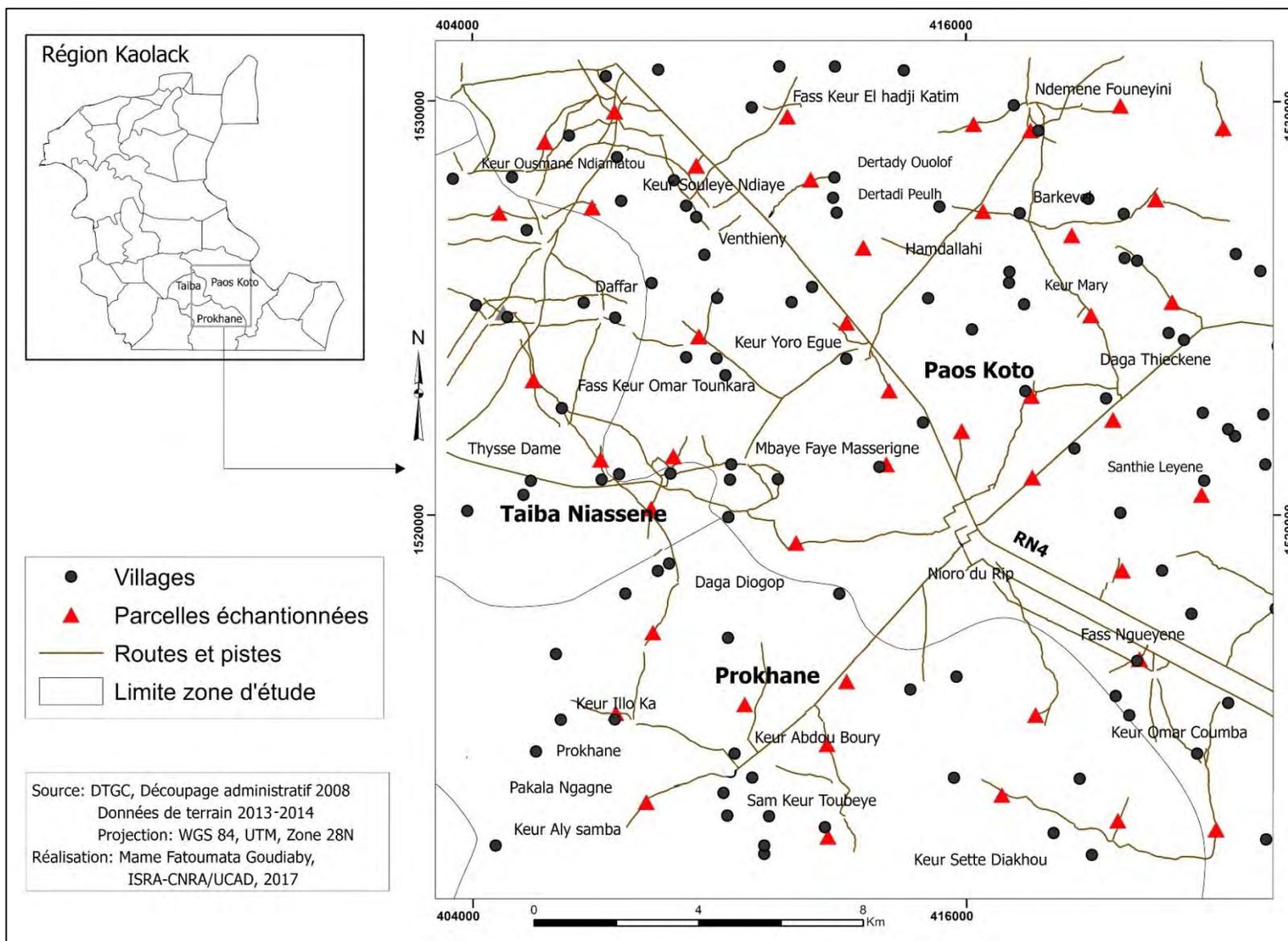
Le développement de stratégies de gestion intégrée des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil à travers l'adoption des bonnes pratiques culturales ainsi que l'utilisation des ennemis naturels pour la lutte biologique serait intéressant dans un contexte d'agriculture de subsistance. Cependant, l'information sur la situation actuelle de ces deux principaux ravageurs tels que leur distribution spatiale, leurs incidence et dégâts mais également leur régulation naturelle par les ennemis naturels est un prérequis à l'adoption de stratégies de gestion intégrée efficace.

Ainsi, cette étude a été entreprise pour i) déterminer la distribution spatiale des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil en milieu paysan ainsi que leur niveau d'infestation et de dégât; ii) déterminer la gamme de parasitoïdes qui leurs sont associés et leur capacité de régulation; iii) déterminer l'effet des pratiques culturales adoptées par les paysans sur l'infestation de ces ravageurs.

#### **4.1. Matériels et méthodes**

##### **4.1.1. Choix des parcelles**

Cette étude a été conduite pendant les hivernages de 2013 et 2014 au centre sud du bassin arachidier. Comme pour le Chapitre 3, l'univers de pixel de 400 km<sup>2</sup> obtenu par acquisition d'images satellitaires a été utilisé. Pour chaque année, 45 points ou parcelles paysans ont été choisis au hasard parmi l'ensemble des points existants. Les parcelles échantillonnées étaient distantes d'au moins 2km (Figure 22).



**Figure 22:** Carte de localisation des parcelles de mil échantillonnées au centre sud du bassin arachidier

## **4.1.2. Echantillonnage des insectes**

### **4.1.2.1. Echantillonnage des foreurs de tiges**

L'échantillonnage des foreurs de tiges dans les parcelles de mil s'est déroulé entre mi- septembre et mi- octobre coïncidant avec le début de l'épiaison et la maturité physiologique de la culture. Un plan d'échantillonnage stratifié semi-aléatoire a été adopté (Bonato *et al.*, 1999). Chaque parcelle de mil a été subdivisée en 4 strates et dans chaque strate 4 poquets ont été choisis au hasard. Les observations ont été étalées sur 3 dates avec au total 48 poquets échantillonnés par parcelle soit 2160 poquets échantillonnés pour chaque année. Sur chaque poquet, le nombre de tiges saines et infestées ont été comptés puis 2 tiges infestées ont été échantillonnées et ramenées au laboratoire. Pour chaque année, un total de 4320 tiges ont été échantillonnées, disséquées et les larves dénombrées. Les larves ont été ensuite incubées afin d'identifier les espèces de foreurs et les parasitoïdes émergés.

### **4.1.2.2. Echantillonnage de la mineuse de l'épi**

Le suivi de la mineuse de l'épi a eu lieu à la même période que pour les foreurs de tiges et le même plan d'échantillonnage adopté pour ces derniers a été utilisé. Quatre poquets de mil ont été également choisis au hasard dans chaque strate pour dénombrer le nombre d'épi minés et le nombre d'épi sains. Sur les épis infestés, le nombre de larves vivantes, parasitées et/ou mortes en présence de cocons dans les galeries ont été comptés. Les épis hébergeant des larves mortes, immobiles ou des cocons de parasitoïdes ont été ensuite ramenés au laboratoire pour incubation et identification des parasitoïdes. Au total 2160 poquets et 4320 épis ont été également échantillonnés.

### **4.1.2.3. Pertes de rendement**

Les pertes en grain ont été évaluées à partir des dégâts de la mineuse de l'épi qui provoque les chutes de grain et engendre ainsi des pertes quantitatives. Au niveau de chaque poquet échantillonné, le nombre de galeries, leur longueur et largeur ont été comptés ou mesurés sur les épis minés. A la maturité du mil, 2 épis de mil indemnes d'attaques de maladies et d'insectes ont été prélevés dans chaque parcelle pour l'estimation des pertes de grains soit un total de 90 épis sains échantillonnés.

## **4.1.3. Identification des insectes**

Les foreurs de tiges ainsi que les parasitoïdes émergés des échantillons de tiges et d'épis incubés au laboratoire ont été identifiés sous microscope optique à l'aide des clés taxonomiques de Teetes *et al.* (1983); Youm *et al.* (1996); Maes (2000); Van Achterberg et Walker (2000).

#### 4.1.4. Estimation des variables

##### 4.1.4.1. Distribution spatiale des insectes

Dans un milieu donné, les individus d'une même espèce ne sont pas toujours répartis de façon aléatoire (Krebs, 1999). Selon les espèces de ravageurs rencontrés, différents types de distribution spatiale sont utilisés pour les caractériser, estimer leur abondance et déterminer les écart-types ou les intervalles de confiance de leurs paramètres de dispersion (Krebs, 1999; Amaral *et al.*, 2015). Ces différents types de distribution spatiale sont déterminés à partir de l'estimation des indices de dispersion spatiale (Krebs, 1999; Amaral *et al.*, 2015). Ainsi, la distribution spatiale des larves de foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi du mil a été calculée à partir de l'indice de Morisita standardisé (Smith-Gill, 1975) selon les formules (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) et (3.7).

$$M = n \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - \sum_{i=1}^n x_i} \right] \quad (3.1)$$

$$Mu = \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2 - n + \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i - 1} \quad (3.2)$$

$$Ma = \frac{\chi_{\alpha/2}^2 - n + \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i - 1} \quad (3.3)$$

$$Ms = (0,5 + 0,5(M - Ma))/(n - Ma) \text{ pour } 1 \leq Ma < M \quad (3.4)$$

$$Ms = 0,5(M - 1)/(Ma - 1) \text{ pour } 1 \leq M < Ma \quad (3.5)$$

$$Ms = -0,5(M - 1)/(Ma - 1) \text{ pour } Mu < M \leq 1 \quad (3.6)$$

$$Ms = (-0,5 + 0,5(M - Mu))/Mu \text{ pour } M < Mu \leq 1 \quad (3.7)$$

Où  $M$  = indice de Morisita;  $x_i$  = nombre de larves obtenus à la  $i^{\text{ème}}$  strate ( $i = 1, 2 \dots n$ );  $n$  = nombre de strates ( $i = 1, 2 \dots 4$ ) échantillonnées;  $Mu$  = indice de Morisita pour une distribution régulière ou homogène;  $Ma$  = indice de Morisita pour une distribution agrégative;  $\chi^2$  = Loi khi deux;  $\alpha$  = seuil de probabilité (0,05);  $Ms$  = indice de Morisita standardisé.

##### 4.1.4.2. Incidence des insectes

L'incidence des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi a été calculée à partir de la formule (3.8).

$$I (\%) = \frac{Pi}{Pt} \times 100 \quad (3.8)$$

Où  $I$  = incidence;  $Pi$  = nombre de plants infestés par les foreurs ou la mineuse;  $Pt$  = nombre totale de plants échantillonnés.

#### 4.1.4.3. Parasitisme des insectes

Le parasitisme a été également estimé selon la formule (3.9):

$$P(\%) = \frac{NLp}{NLt} \times 100 \quad (3.9)$$

Où  $P$  = taux de parasitisme ;  $NLp$  = nombre de larves parasitées ;  $NLt$  = nombre total de larves échantillonnées.

#### 4.1.4.4. Pertes de rendement en grains

Sur la base de la longueur et du diamètre des épis ainsi que du nombre, de la longueur et de la largeur des galeries, les pertes en grains ont été estimées par simulation des dégâts sur les épis sains préalablement prélevés dans chaque parcelle pendant l'échantillonnage. Ainsi, des galeries ont été réalisées sur les épis puis les grains enlevés ont été pesés. Les pertes ont été par la suite estimées à partir des formules (3.10) et (3.11).

$$Pp (g) = DE * LG + c \quad (3.10)$$

$$Ps(kg) = Pp * \frac{DP}{1000} * I \quad (3.11)$$

Où  $Pp$  = perte potentielle par épi;  $DE$  = diamètre épi;  $LG$  = longueur galerie;  $c$  = constante (perte moyen par épi);  $Ps$  = perte simulée à l'hectare;  $DP$  = densité de plantation;  $I$  = incidence de la mineuse.

#### 4.1.5. Enquête agronomique

Chaque propriétaire des parcelles de mil échantillonnées a été interviewé sur la base d'un questionnaire. Les variables intégrées dans le formulaire d'enquête comportaient le travail du sol, la rotation culturale et la période de semis.

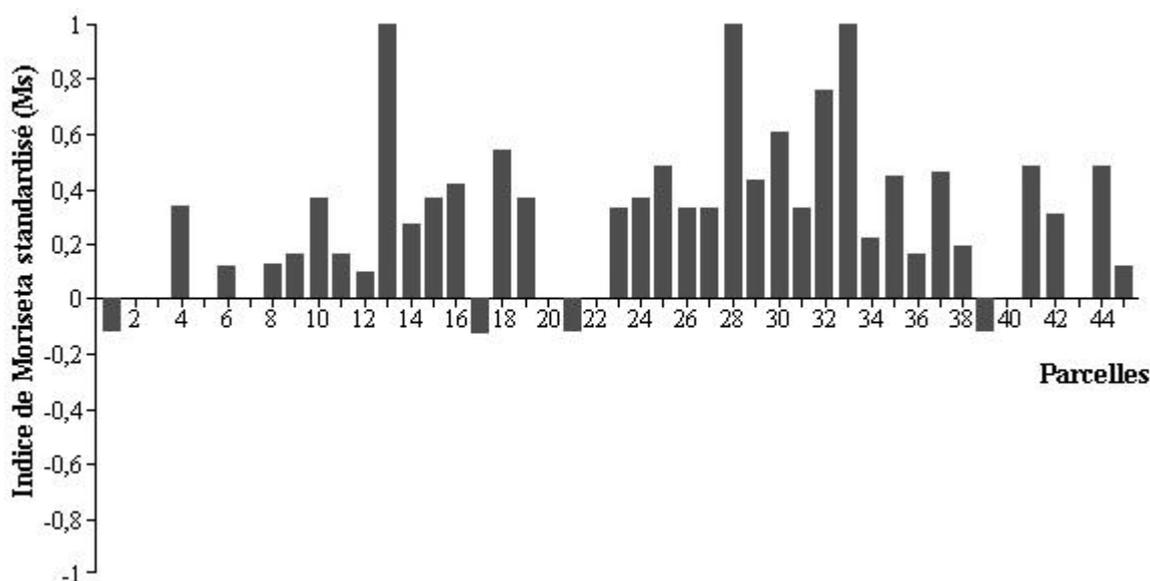
#### 4.1.6. Analyse des données

Le calcul des moyennes et écart-type des différents paramètres étudiés (incidence, densité des larves, parasitisme et pertes) a été fait à l'aide du logiciel SAS 9.1. Pour déterminer l'effet des pratiques culturales sur l'incidence et la densité des larves de foreurs et de la mineuse de l'épi ainsi que sur les pertes en grains estimées, les données des deux années ont été regroupées. L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée à l'aide de la procédure linéaire généralisée «GLM» du logiciel SAS 9.1. La comparaison des moyennes a été effectuée avec le test de Student Newman Keuls au seuil de probabilité  $\alpha=0,05$ . Les proportions (incidence et pertes) ont été transformées avec  $\arcsine\sqrt{X + 0,5}$  alors que les nombres (densité des larves) ont été transformés à l'aide de  $\log_{10}(X + 1)$  où  $X$  est la variable considérée (SAS, 2003; McDonald, 2009).

## 4.2. Résultats

### 4.2.1. Distribution spatiale des larves de foreurs de tiges

L'indice de Morisita standardisée a été positif avec un maximum de 1 dans la majorité de parcelles échantillonnées. Il a été négatif à nul dans seulement une douzaine de parcelles dénotant ainsi une distribution agrégative des larves de foreurs de tiges dans les parcelles de mil (Figure 23).

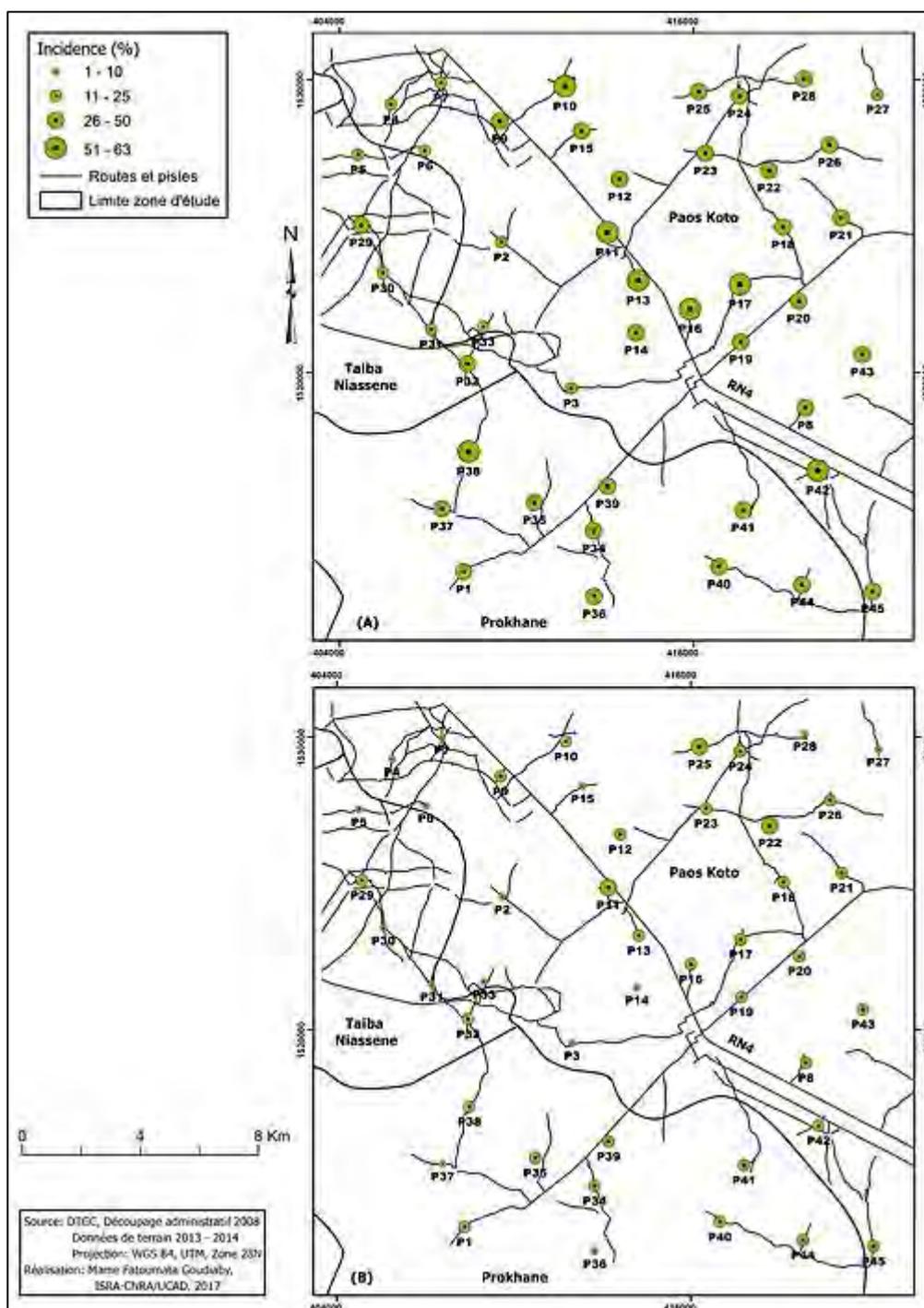


**Figure 23:** Distribution spatiale des larves de foreurs de tiges dans les parcelles de mil suivies au centre sud du bassin arachidier.

**NB:** Distribution normale ( $Ms=0$ ); distribution agrégative ( $Ms>0$ ); distribution régulière ( $Ms<0$ ).

### 4.2.2. Incidence des larves de foreurs de tiges

L'incidence des larves de foreurs de tiges dans les parcelles de mil exprimée en pourcentage de tiges infestées a varié entre 1 - 63% au cours des saisons culturales de 2013 et 2014 (Figure 24). En 2013, la gamme d'incidence comprise entre 26 et 50% a été essentiellement prédominante dans la zone d'étude suivie de la gamme 11 - 25%. La gamme d'incidence comprise entre 51 et 63% de tiges infestées a été faiblement représentée (Figure 24 a). Par contre en 2014, la gamme d'incidence la plus représentée a été comprise entre 11 et 25% suivie de la gamme 1 - 10%. Celle comprise entre 26 - 50% a été très faiblement représentée tandis que la gamme supérieure à 50% de tiges infestées n'a pas été enregistrée (Figure 24 b). D'une saison à l'autre, l'incidence des foreurs de tiges a été significativement variable dans la zone d'étude ( $F_{1,359}=158,01$ ;  $P<0,0001$ ). La saison de 2013 a enregistré l'incidence la plus élevée avec 35% de tiges infestées (Tableau 3).



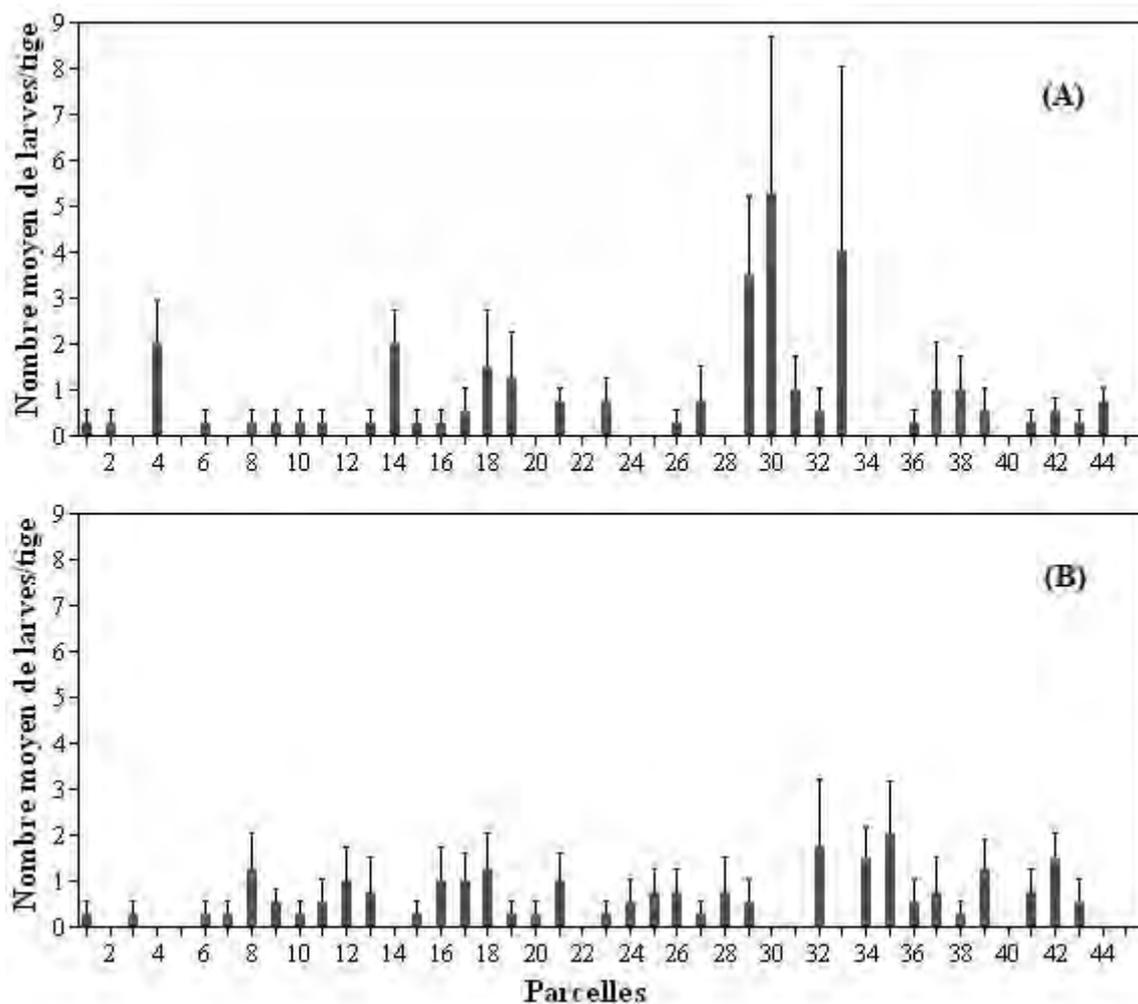
**Figure 24:** Carte de distribution de l'incidence des foreurs de tiges au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.

**Tableau 3:** Effet de la saison culturale sur l'incidence, la densité et le parasitisme des larves de foreurs de tiges dans le centre sud du bassin arachidier.

Saison culturale	Moyenne±ET		
	Incidence (%)	Densité de larves (larve/épi)	Taux de parasitisme (%)
2013	35,28±1,44a	0,67±0,13a	7,73±1,87a
2014	14,86±0,77b	0,55±0,08a	3,37±1,10a

### 4.2.3. Densité des larves de foreurs de tiges

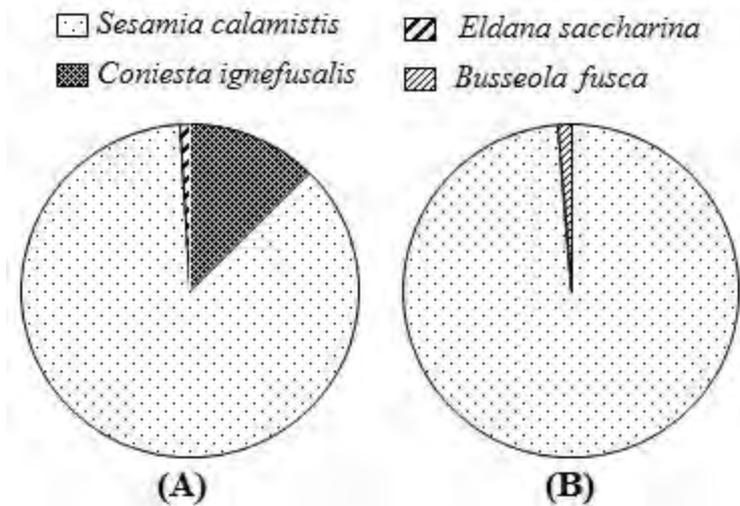
Pendant la saison culturale de 2013, la densité des larves de foreurs de tiges a varié entre 0 et  $5,25 \pm 3,42$  larves/tige selon les parcelles (Figure 25 a). En 2014, elle a été comprise entre 0 et  $2,00 \pm 1,15$  larves/tige. (Figure 25 b). En moyenne dans la zone d'étude, la densité des larves de foreurs a varié entre  $0,67 \pm 0,13$  et  $0,55 \pm 0,08$  larves/tige sans aucune différence significative entre les saisons de 2013 et 2014 (Tableau 3).



**Figure 25:** Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves de foreurs par tige dans les parcelles de mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.

### 4.2.4. Composition et importance relative des espèces de foreurs de tiges du mil

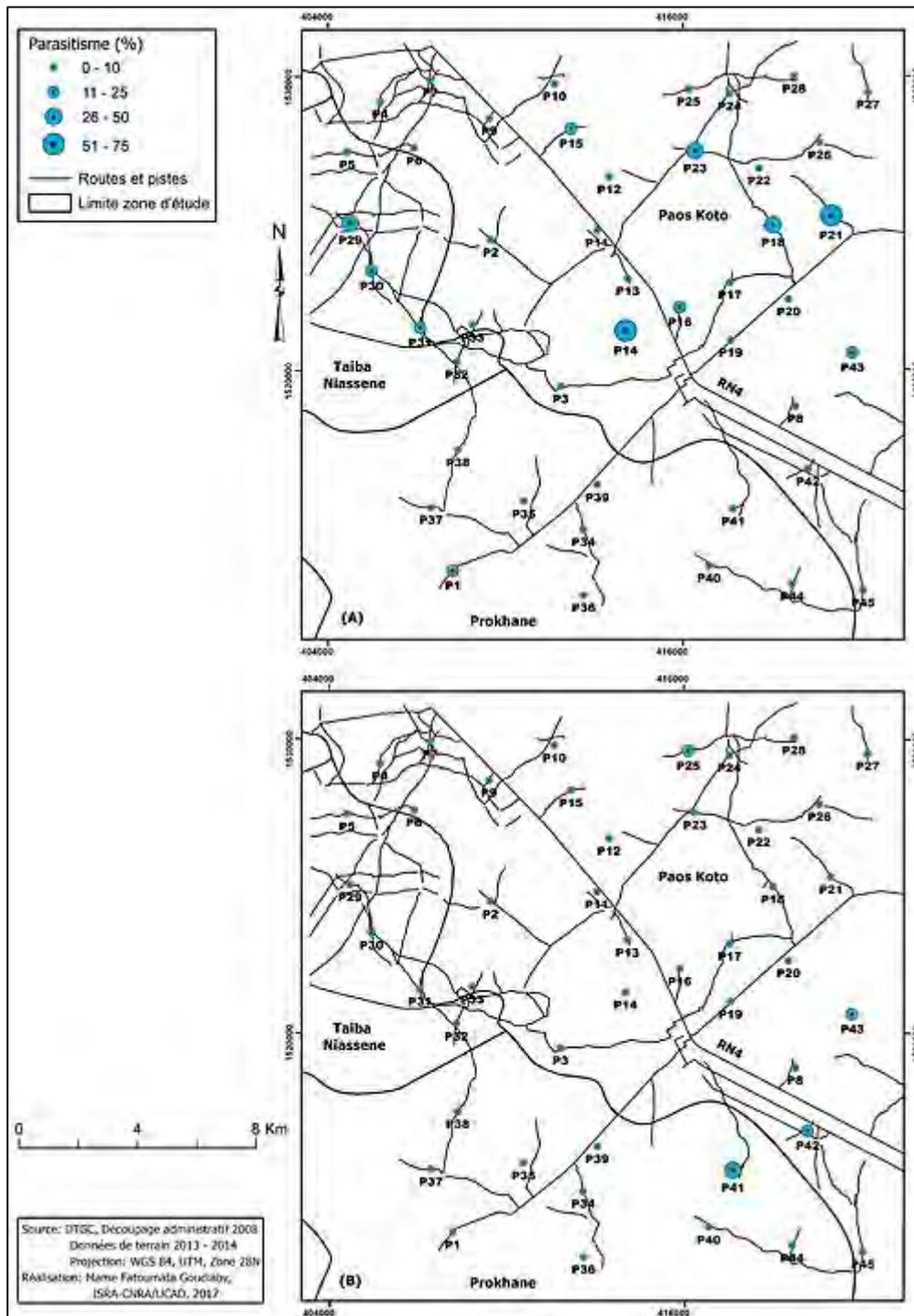
Quatre espèces de foreurs de tiges ont été observées dans les différentes parcelles de mil (Figure 26). En 2013, *S. calamistis* a été l'espèce la plus rencontrée représentant 87% des foreurs suivi de *C. ignefusalis* qui a représenté 12% des échantillons. *E. saccharina* a été très rare avec seulement 1% du total des trois espèces rencontrées (Figure 26 a). En 2014, la composition des foreurs de tiges a été uniquement constituée de *S. calamistis* et *B. fusca* qui ont représenté respectivement 99% et 1% des échantillons (Figure 26 b).



**Figure 26:** Composition et importance relative des foreurs de tiges au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014.

#### 4.2.5. Parasitisme des larves de foreurs de tiges

Le parasitisme des larves de foreurs de tiges a varié entre 0 et 75% de larves parasitées au cours des saisons culturales de 2013 et 2014 (Figure 27). La gamme de parasitisme comprise entre 0 et 10% a été prédominante en 2013. Par contre les gammes de parasitisme comprises entre 11 - 25%, 26 - 50% et 51 - 75% de larves parasitées ont été rares dans la zone d'étude (Figure 27 a). Pour la saison 2014, la gamme de parasitisme des larves de 0 - 10% a été essentiellement enregistrée. Celle comprise entre 51 - 75% n'a pas été enregistrée alors que les gammes de parasitisme comprises entre 11 - 25% et 26 - 50% ont été quasi absentes (Figure 27 b). D'une saison à l'autre, le taux de parasitisme des larves de foreurs de tiges a varié en moyenne entre 3 - 7% de larves parasitées dans la zone d'étude. Toutefois, la variabilité notée entre les saisons n'a pas été significative (Tableau 3).



**Figure 27:** Carte de distribution du parasitisme des larves de foreurs de tiges du mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.

#### 4.2.6. Importance relative des parasitoïdes des larves de foreurs de tiges

La mortalité des larves de foreurs de tiges au niveau des différentes parcelles suivies a été principalement due aux parasitoïdes Braconidae, *Bracon brevicornis* Wesmael et *Stenobracon (Euvipio) rufus* Szepligeti, au Tachinidae, *Sturmiopsis parasitica* et au Chalcididae *Psilochalsis soudanensis* (Tableau 4). *B. brevicornis* a été recouvert uniquement sur les larves de *S. calamistis*

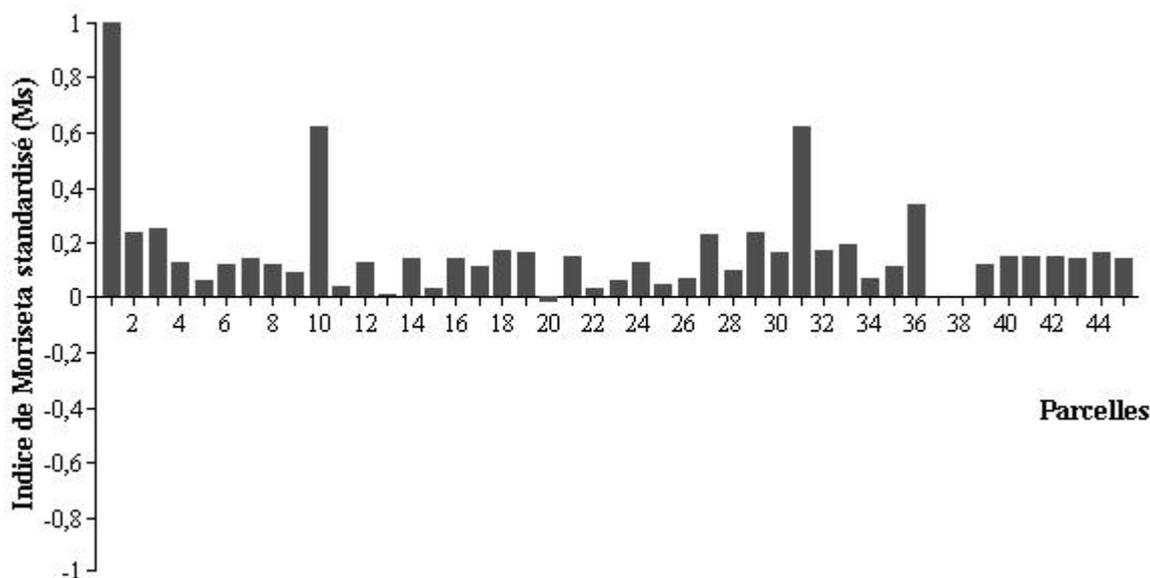
avec  $16,4\pm 4,92\%$  et  $8,45\pm 2,82\%$  des larves parasitées respectivement en 2013 et en 2014. Les espèces *S. rufus*, *S. parasitica* et *P. soudanensis* ont été seulement rencontrées en 2013 parasitant respectivement  $3,17\pm 2,32\%$ ,  $2,86\pm 2,34\%$  et  $0,32\pm 0,32\%$  des larves de *C. ignefusalis* (Tableau 4).

**Tableau 4:** Composition et distribution des parasitoïdes des larves de foreurs de tiges au cours des saisons culturales de 2013 et 2014

Saisons culturales	Parasitoïdes			Insectes Hôtes	Pourcentage de larves parasitées (%)
	Ordre	Famille	Espèces	Espèces	
2013	Hymenoptera	Braconidae	<i>Bracon brevicornis</i>	<i>S. calamistis</i>	$16,4\pm 4,92$
			<i>Stenobracon rufus</i>	<i>C. ignefusalis</i>	$3,17\pm 2,32$
		Chalcididae	<i>Psilochalsis soudanensis</i>	<i>C. ignefusalis</i>	$0,32\pm 0,32$
		Tachinidae	<i>Sturmiopsis parasitica</i>	<i>C. ignefusalis</i>	$2,86\pm 2,34$
2014		Braconidae	<i>B. brevicornis</i>	<i>S. calamistis</i>	$8,45\pm 2,82$

#### 4.2.7. Distribution spatiale des larves de la mineuse de l'épi

Pour les larves de la mineuse de l'épi, l'indice de Morisita standardisé a été positif dans l'essentiel des parcelles. Il a été nul dans deux parcelles et négatif dans seulement une parcelle. Ce qui indique généralement une distribution spatiale agrégative des larves de la mineuse de l'épi (Figure 28).



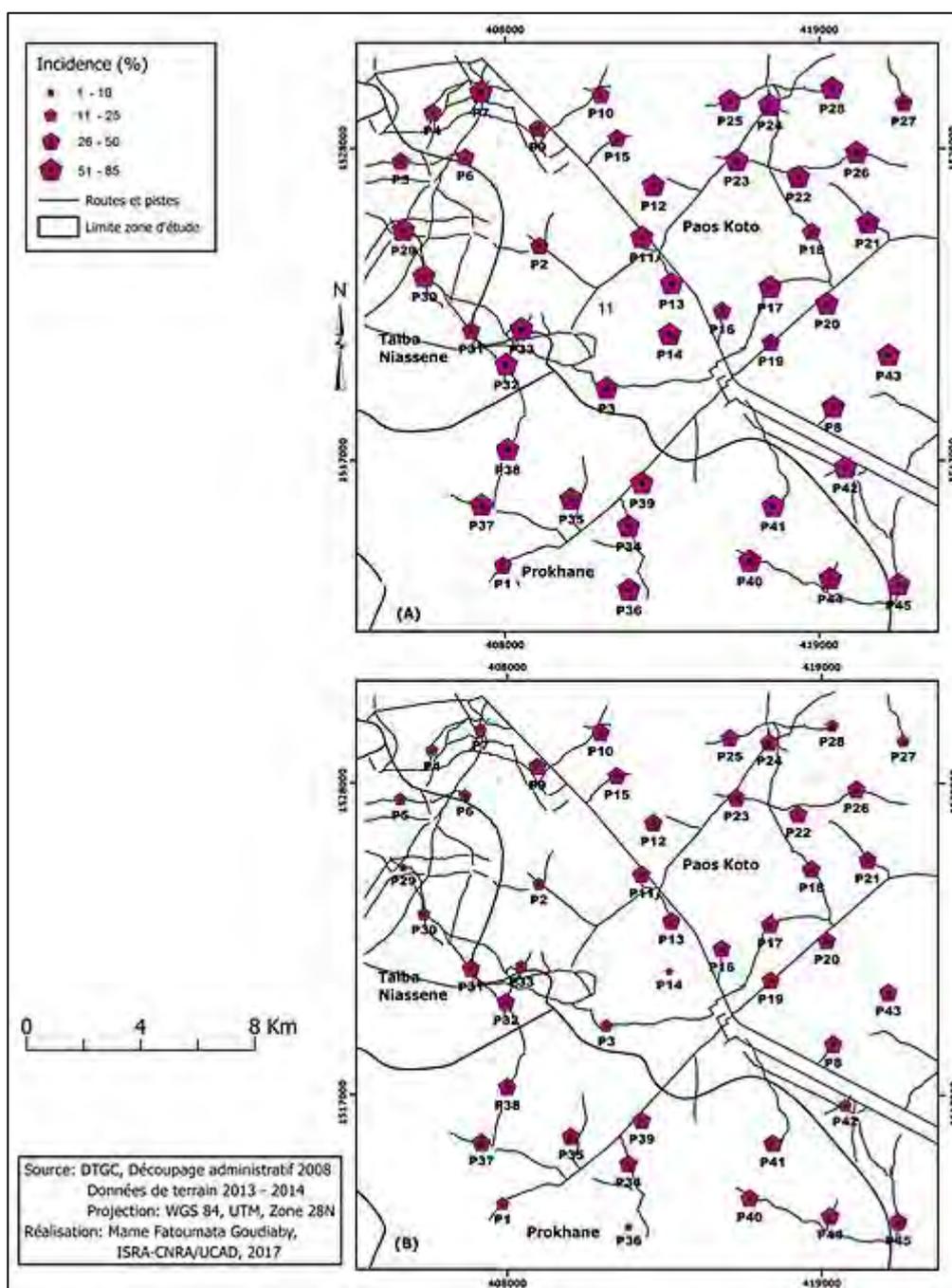
**Figure 28:** Distribution spatiale des larves de la mineuse de l'épi dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

NB: Distribution normale ( $M_s=0$ ); distribution agrégative ( $M_s>0$ ); distribution régulière ( $M_s<0$ ).

#### 4.2.8. Incidence des larves de la mineuse de l'épi

L'incidence des larves de la mineuse de l'épi a varié entre 7 et 85% d'épis infestés selon les parcelles de mil pendant les saisons culturales de 2013 et 2014 (Figure 29). Pendant la saison de 2013, la gamme d'incidence comprise entre 51 et 85% a été principalement enregistrée. La gamme d'incidence comprise entre 26 et 50% a été faiblement représentée (Figure 29 a). Par contre, en

2014, la gamme d'incidence de 26 - 50% d'épis infestés a été prédominante dans la zone d'étude suivie de celle 11 - 25%. Les gammes d'incidence de 1 - 10% et 51 - 85% ont été moins fréquentes (Figure 29 b). Généralement dans la zone d'étude, l'incidence de la mineuse de l'épi a été significativement variable d'une saison à l'autre ( $F_{1,1439}=250,84$ ;  $P<0,0001$ ). Elle a été plus élevée en 2013 avec une moyenne de 54 % d'épis infestés contrairement à la saison de 2014 (31% d'épis infestés) (Tableau 5).



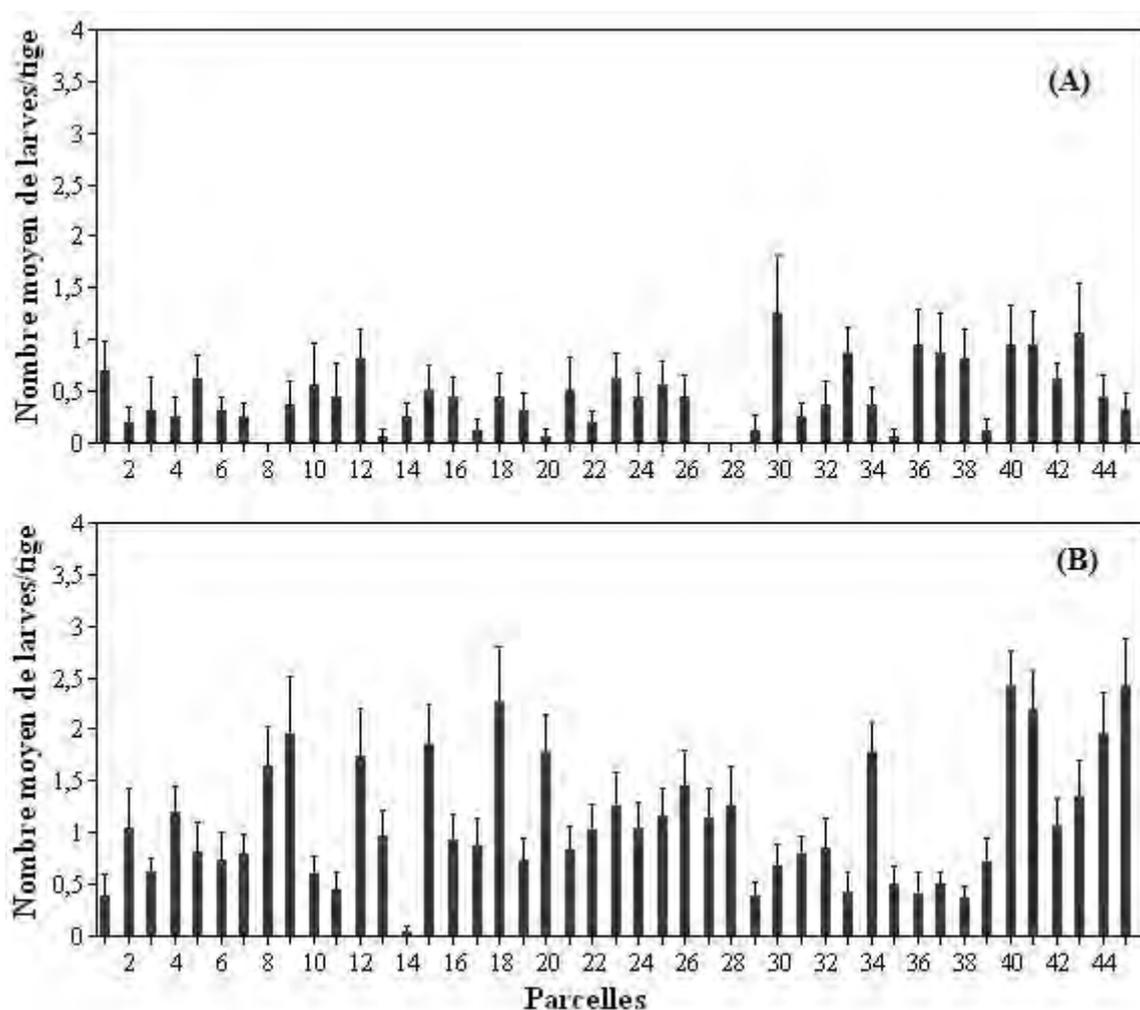
**Figure 29:** Carte de distribution de l'incidence de la mineuse de l'épi du mil au cours des saisons culturelles de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier

**Tableau 5:** Effet de la saison culturale sur l'incidence, la densité et le parasitisme des larves de la mineuse de l'épi dans le centre sud du bassin arachidier.

Saison culturale	Moyenne±ET			
	Incidence (%)	Densité de larves (larve/épi)	Pertes en grains (kg/ha)	Taux de parasitisme (%)
2013	54,53±1,20a	0,45±0,04b	79,27±2,72a	19,93±1,46b
2014	31,22±0,73b	1,10±0,05a	47,02±1,74b	30,28±1,50a

#### 4.2.9. Densité des larves de la mineuse de l'épi

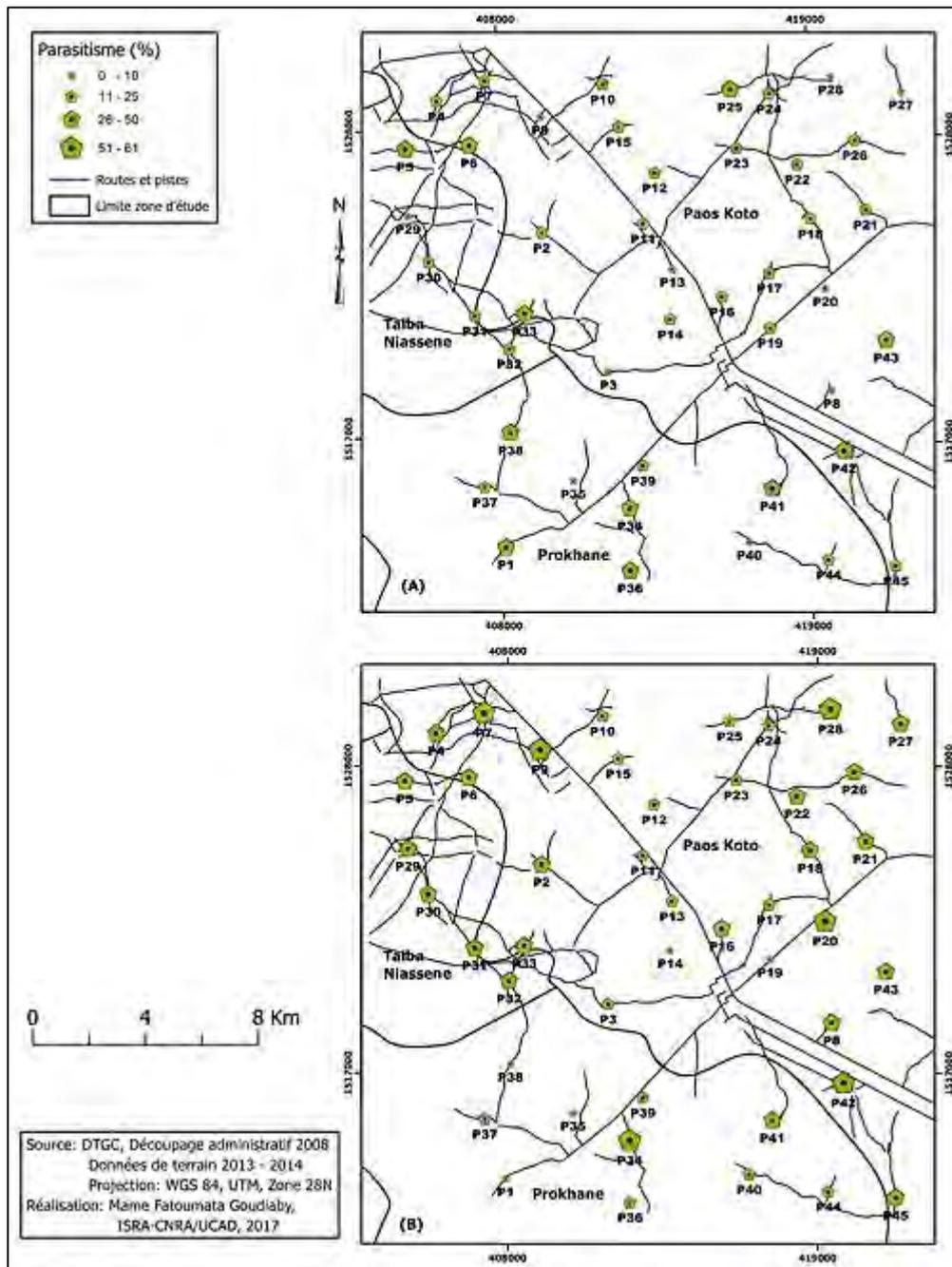
La densité des larves de la mineuse de l'épi a varié selon les parcelles entre 0 - 1,25±0,54 et 0 - 2,42±0,32 larves/épi respectivement en 2013 (Figure 30 a) et 2014 (Figure 30 b). Entre les deux saisons, la densité des larves a été significativement variable ( $F_{1,1439}=138,45$ ;  $P<0,0001$ ) avec un nombre moyen de larves par épi plus élevé (1,10±0,05 larves/épi) enregistré en 2014 (Tableau 5).



**Figure 30:** Nombre moyen (±écart-type) des larves de la mineuse par épi dans les parcelles de mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier

#### 4.2.10. Parasitisme des larves de la mineuse de l'épi

Au cours des saisons culturales de 2013 et 2014, le parasitisme sur les larves de la mineuse de l'épi a été dû essentiellement à *B. hebetor* et a varié entre 0 et 61% de larves parasitées selon les parcelles de mil (Figure 31). En 2013, la gamme de parasitisme des larves comprise entre 11 - 25% a été principalement enregistrée suivie de celles de 0 - 10% et 26 - 50% (Figure 31 a). Par contre, pendant la saison 2014, les gammes de parasitisme comprises entre 11 - 25% et 26 - 50% de larves parasitées ont été prédominantes dans la zone d'étude. Les gammes de parasitisme 0 - 10% et 51 - 61% enregistrées ont été rares (Figure 31 b). Généralement dans la zone d'étude, le niveau de parasitisme des larves de la mineuse de l'épi a été significativement faible ( $F_{1,1080}=37,33$  ;  $P<0,0001$ ) pendant la saison de 2013 avec en moyenne 19% de larves parasitées comparativement à 2014 (Tableau 5).

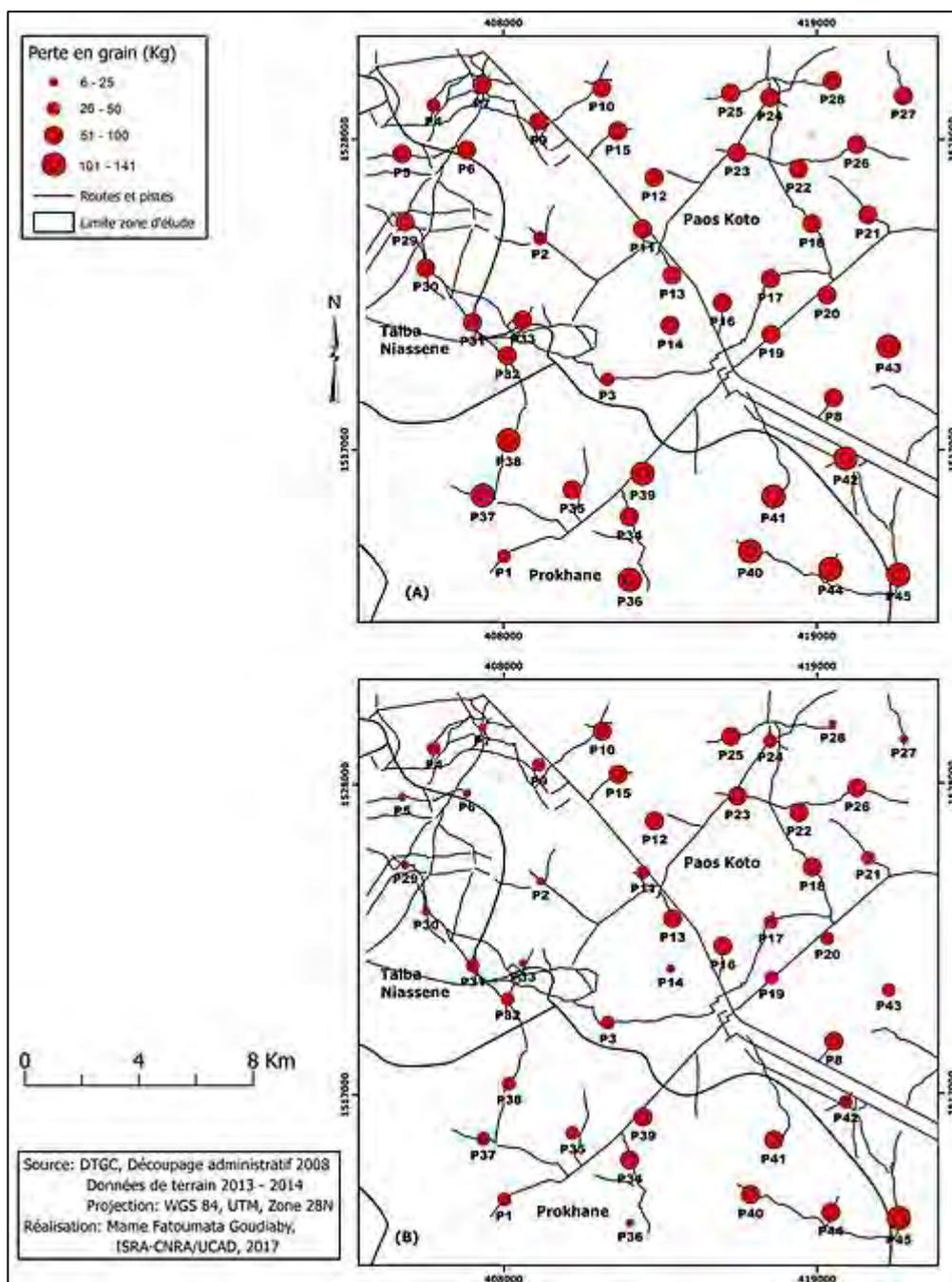


**Figure 31:** Carte de distribution du parasitisme des larves de la mineuse de l'épi du mil au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.

#### 4.2.11. Pertes en grains

Les pertes en grains dues à la mineuse de l'épi estimées pendant les saisons de 2013 et 2014 ont varié entre 6 et 141kg/ha (Figure 32). En 2013, les pertes en grains ont été comprises essentiellement dans la gamme variant de 51 à 100kg/ha. Les gammes de pertes de 26 - 50kg/ha et 101 - 141kg/ha ont été faiblement enregistrées (Figure 32 a). En 2014, la gamme de pertes comprise entre 101 - 141kg/ha a été quasi absente. Par contre, la gamme variant de 26 à 50Kg/ha a été la plus fréquente suivie de celle 51 - 100kg/ha puis de la gamme 6 - 25kg/ha (Figure 32 b). Généralement, les pertes en grains ont été significativement variable selon les saisons

( $F_{1,1439}=98,62$  ;  $P<0,0001$ ). Pendant la saison de 2013, les pertes ont été plus élevées dans la zone d'études avec une moyenne de  $79,27 \pm 2,72$  kg/ha contrairement à la saison de 2014 ( $47,02 \pm 1,74$  kg/ha) (Tableau 5).

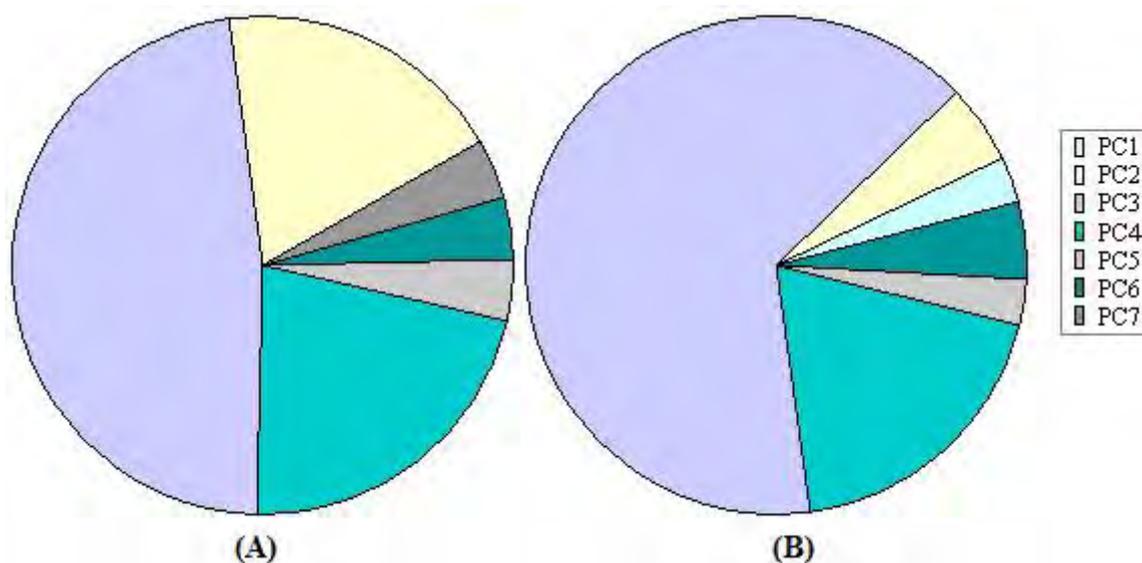


**Figure 32:** Carte de distribution des pertes en grains estimées au cours des saisons culturales de A) 2013 et B) 2014 dans le centre sud du bassin arachidier.

#### 4.2.12. Pratiques culturales des producteurs

Dans la zone d'étude, la combinaison rotation culturale et semis précoce (PC3) est pratiquée par 48% à 65% des producteurs suivie de la combinaison rotation culturale et semis tardif (PC4) qui elle est pratiquée par 19% à 22% des producteurs (Figure 33). La pratique culturale PC2 (semis tardifs) a été également assez utilisée (19%) en 2013 et très faiblement (5%) en 2014 (Figure 33).

Les producteurs ont très peu (3-5%) fait recours aux pratiques culturelles PC1, PC5, PC6 et PC7 (Figure 33).

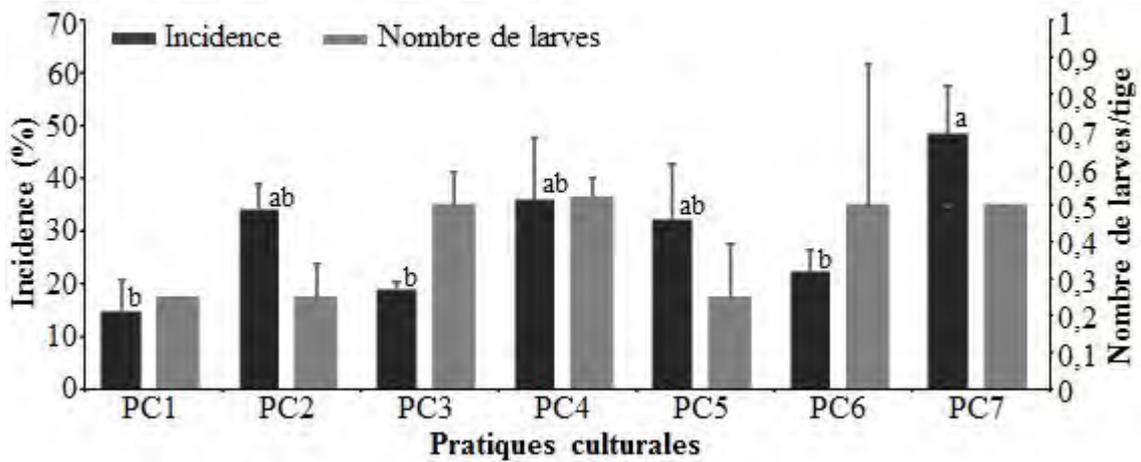


**Figure 33:** Proportion (%) des pratiques culturelles effectuées par les producteurs de mil en A) 2013 et B) 2014 au centre sud du bassin arachidier.

**NB:** PC= pratiques culturelles; PC1= semis précoce (1-6 jrs après la première pluie utile); PC2= semis tardif (plus de 7jrs après la première pluie utile); PC3= rotation+semis précoce; PC4= rotation+semis tardif; PC5=labour+semis tardif; PC6=labour+ rotation+semis précoce; PC7=labour+ rotation+semis tardif.

#### 4.2.13. Effet des pratiques culturelles sur l'incidence et la densité des larves de foreurs de tiges

L'incidence des foreurs de tiges a été significativement plus importante ( $48,96 \pm 4,00\%$  ;  $F_{6,65} = 5,63$ ;  $P < 0,0001$ ) dans les parcelles où la combinaison labour, rotation et semis tardifs (PC7) a été pratiquée comparativement aux parcelles avec un semis précoce (PC1), une combinaison rotation et semis précoce (PC3) ainsi qu'une combinaison labour, rotation et semis précoce (PC6) qui ont enregistré une faible incidence entre  $15,22 \pm 5,94\%$  et  $22,80 \pm 4,03\%$  de tiges infestées (Figure 34). Une incidence moyenne des foreurs de tiges ( $32,82 \pm 4,15\%$  et  $36,45 \pm 3,70\%$ ) a été notée dans les parcelles avec les pratiques PC2 (semis tardif), PC4 (combinaison rotation et semis tardif) et PC5 (combinaison labour et semis tardif). Pour la densité des larves, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes pratiques culturelles effectuées par les producteurs (Figure 34).

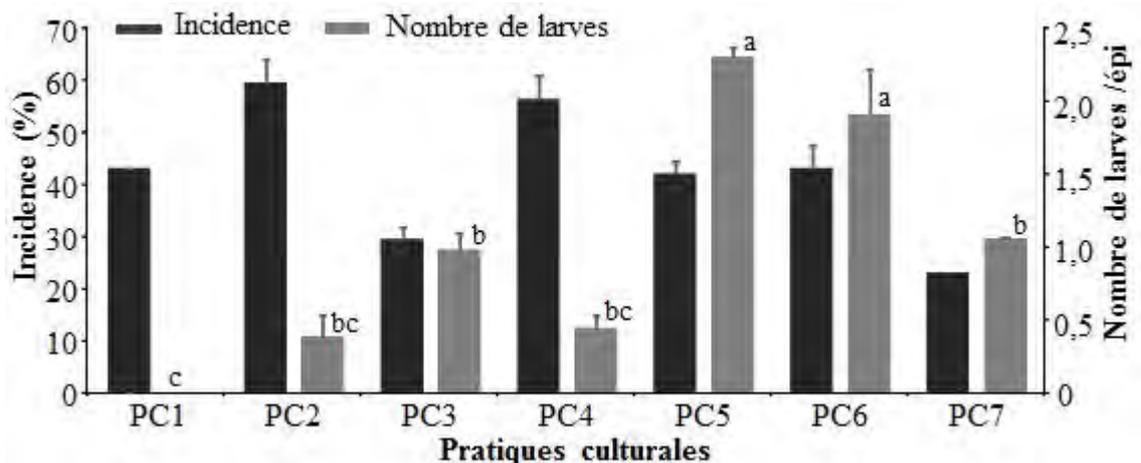


**Figure 34:** Incidence et nombre de larves des foreurs de tiges en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

NB: PC= pratiques culturales; PC1= semis précoce (1-6 jrs après la première pluie utile); PC2= semis tardif (plus de 7jrs après la première pluie utile); PC3= rotation+semis précoce; PC4= rotation+semis tardif; PC5=labour+semis tardif; PC6=labour+ rotation+semis précoce; PC7=labour+ rotation+semis tardif.

#### 4.2.14. Effet des pratiques culturales sur l'incidence et la densité des larves de la mineuse de l'épi

Pour la mineuse de l'épi, aucune différence significative n'a été observée pour l'incidence entre les différentes pratiques culturales (Figure 35). Par contre, la densité des larves a été significativement élevée ( $1,91 \pm 0,30$  -  $2,31 \pm 0,07$  larves/épi;  $F_{6,65} = 14,51$ ;  $P < 0,0001$ ) dans les parcelles avec les combinaisons labour et semis tardif (PC5) et labour, rotation et semis précoce (PC6) comparativement aux parcelles où les autres pratiques culturales ont été effectuées (Figure 35).

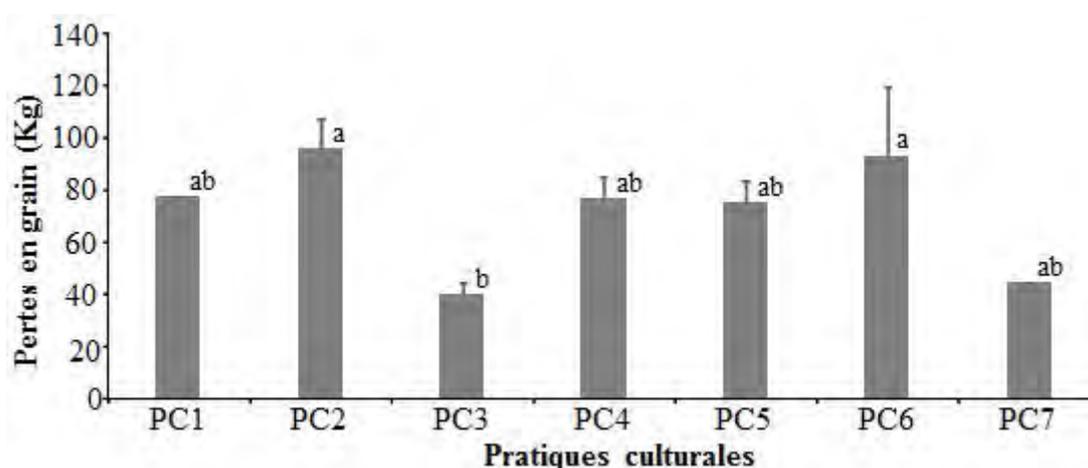


**Figure 35:** Incidence et nombre de larves de la mineuse de l'épi en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

NB: PC= pratiques culturales; PC1= semis précoce (1-6 jrs après la première pluie utile); PC2= semis tardif (plus de 7jrs après la première pluie utile); PC3= rotation+semis précoce; PC4= rotation+semis tardif; PC5=labour+semis tardif; PC6=labour+ rotation+semis précoce; PC7=labour+ rotation+semis tardif.

#### 4.2.15. Effet des pratiques culturales sur les pertes de rendement en grains estimées

La distribution des pertes de rendement en grains en fonction des différentes pratiques culturales effectuées par les producteurs est présentée sur la figure 36. Une différence significative ( $F_{6,65} = 7,27$  ;  $P < 0,0001$ ) a été notée entre les parcelles avec un semis tardif (PC2) et une combinaison labour, rotation et semis précoce (PC6) qui ont enregistré des pertes élevées ( $92,43 \pm 26,95$  -  $95,58 \pm 11,44$  kg/ha) et les parcelles où la combinaison rotation et semis précoce (PC3) a été pratiquée (Figure 36). Les parcelles avec un semis précoce (PC1), une combinaison rotation et semis tardif (PC4), une combinaison labour et semis tardif (PC5) et une combinaison labour, rotation et semis tardif (PC7) ont enregistré des pertes de rendement en grain moyennement élevée entre  $44,37 \pm 0,00$  et  $77,56 \pm 0,00$  kg/ha (Figure 36).



**Figure 36:** Pertes de rendement en grain en fonction des pratiques culturales effectuées dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier.

NB: PC= pratiques culturales; PC1= semis précoce (1-6 jrs après la première pluie utile);  
PC2= semis tardif (plus de 7jrs après la première pluie utile); PC3= rotation+semis précoce;  
PC4= rotation+semis tardif; PC5=labour+semis tardif; PC6=labour+ rotation+semis précoce;  
PC7=labour+ rotation+semis tardif.

### 4.3. Discussion

Dans cette étude, les résultats ont révélé une distribution principalement agrégative des larves de foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi dans la plupart des parcelles de mil suivies. Les mêmes résultats ont été obtenus par Wale *et al.*, (2006) sur le comportement grégaire des larves de foreurs de tiges, *S. calamistis* et *B. fusca*. Pour *H. albipunctella*, Ngom (2013) a trouvé une distribution agrégative des œufs dans les parcelles de mil. Ce qui conforte nos résultats étant donné que les larves de cette espèce sont très peu mobiles. Cependant, aussi bien les foreurs de tiges que la mineuse de l'épi ont présenté dans quelques parcelles de mil une distribution soit normale (aléatoire) soit régulière. Cela pourrait être dû à l'influence des facteurs de l'environnement tels que l'effet de la pluviométrie mais aussi la régulation biologique exercée par les parasitoïdes et les

prédateurs après l'éclosion des jeunes larves jusqu'à celles plus âgées (Krebs, 1999; Zalucki *et al.*, 2002).

En ce qui concerne les foreurs de tiges, l'incidence globalement faible dans la zone d'étude concorde avec les résultats de Goudiaby *et al.* (2018). Toutefois, dans une autre étude, un niveau d'infestation assez élevé des foreurs de tiges a été obtenu (Drame-Yaye *et al.*, 2003). Aussi, d'une saison à l'autre, il est noté une variabilité de l'incidence des foreurs de tiges qui a été significativement faible pendant la saison de 2014. Cela pourrait s'expliquer par la variabilité de la pluviométrie pendant les deux saisons d'étude avec notamment la pluviométrie faible et irrégulière observée en 2014. La distribution des pluies peut agir sur l'infestation des insectes (Nwanze, 1991; Wale *et al.*, 2006, Tounou *et al.*, 2013) avec généralement un effet sur la levée de la diapause et l'émergence des adultes ainsi que sur leur ponte (Ndoye et Gahukar, 1989). Selon Nwanze (1981), l'infestation des foreurs de tiges tels que *C. ignefusalis*, est généralement faible dans les zones de faible pluviométrie liée à une réduction de l'incidence et du nombre d'individus. En outre, le faible nombre de larves collecté pourrait être lié d'une part par une sous-estimation de la population de foreurs présente dans les parcelles étant donné l'absence d'échantillonnage pendant la phase végétative de la culture. D'autres part, certains facteurs tels que la prédation peuvent également influencer cette densité des insectes (Zalucki *et al.*, 2002; Mutamiswa *et al.*, 2017). Les foreurs de tiges *C. ignefusalis*, *S. calamistis*, *B. fusca* et *E. saccharina* ont été les principales espèces retrouvées dans les tiges de mil. *S. calamistis* a été plus abondant dans les parcelles de mil et la seule espèce rencontrée pendant les deux saisons. Des observations similaires ont été faites dans le bassin arachidier du Sénégal (Goudiaby *et al.*, 2018) mais également en Côte d'Ivoire (Bekoye et Dadie, 2015). Toutefois, ces résultats ne concordent pas avec ceux rapportés ailleurs en Afrique de l'Ouest indiquant une prédominance de *C. ignefusalis* sur le mil (Youm *et al.*, 1996; Harris et Youm 2000; Kfir *et al.*, 2002; Drame-Yaye *et al.*, 2003). Généralement, *S. calamistis* est abondant sur le sorgho, le maïs et la canne sucre (Kfir, 2000; Assefa *et al.*, 2006; Mengistu *et al.*, 2009; Tounou *et al.*, 2013). Son abondance élevée dans le bassin arachidier par rapport aux autres foreurs de tiges comme *C. ignefusalis* pourrait également s'expliquer par une sous-estimation de la population de ce dernier pendant la période d'étude. En effet, une population plus importante de *C. ignefusalis* a été observée par Goudiaby *et al.* (2018) dans la même zone avec cependant une prédominance de *S. calamistis*. Ainsi, cette prédominance de *S. calamistis* serait due probablement à une adaptation sur le mil principalement cultivé dans le bassin arachidier par rapport aux autres spéculations hôtes mais également aux variations de pluviométrie et de températures qui peuvent lui conférer un avantage compétitif favorable. Cette étude confirme également la faible abondance de *B. fusca* et *E. saccharina* sur la culture du mil (Harris et Youm

2000; Kfir *et al.*, 2002; Goudiaby *et al.*, 2018). En effet, *B. fusca* est avant tout un insecte inféodé au sorgho et au maïs tandis que *E. saccharina* lui s'attaque plutôt à la canne à sucre (Kfir *et al.*, 2002; Assefa *et al.*, 2006; Hordzi et Botchey, 2012). L'importance relative des espèces de foreurs de tiges pourrait être liée à leur adaptation spécifique compte tenu de leurs exigences écologiques (Matama-Kauma *et al.*, 2006). Globalement, le faible niveau de parasitisme naturel des larves de foreurs de tiges enregistré confirme les observations de nombreux auteurs (Nwanze, 1991; Youm et Gilstrap, 1993b; Bosquez-Perez *et al.*, 1994; Youm *et al.*, 1996). Ce faible parasitisme serait dû probablement à une faible densité des parasitoïdes liée à l'abondance réduite des foreurs de tiges ou encore à l'absence de zone de refuge où ils peuvent se maintenir pendant la saison sèche (Gounou *et al.*, 2009; Tounou *et al.*, 2013). En effet, au retour de la saison des pluies, les ennemis naturels peuvent mettre du temps à retourner dans les milieux cultivés mais également à développer leur population dans un contexte d'hivernage de plus en plus réduit et de variétés cultivées à cycle court. Cependant, un niveau jusqu'à 75% de parasitisme des larves de foreurs de tiges peut être noté par endroit principalement au niveau des parcelles situées à proximité des habitations. Cela pourrait expliquer le parasitisme élevé étant donné que les habitations en milieu paysans abritent le plus souvent des greniers et magasins qui hébergent plusieurs lépidoptères ravageurs des grains stockés tels que *Ephestia spp* servant d'hôtes alternatifs à de nombreux parasitoïdes notamment au Braconidae (Milonas, 2005; Ghimire and Phillips, 2010a). En Afrique de l'Est et australe, en raison d'une gamme plus élargie de plantes hôtes, les foreurs de tiges se développent plus facilement et permettent des choix préférentiels aux parasitoïdes. Ce qui expliquerait le niveau de parasitisme plus élevé dans ces régions contrairement à ce qui est constaté en Afrique de l'Ouest y compris au Sénégal (Chinwada, 2002; Wale *et al.*, 2006a; Moolman *et al.*, 2013; Mutamiswa *et al.*, 2017). Les principaux parasitoïdes des larves de foreurs de tiges étaient *Bracon brevicornis* rencontré sur *S. calamistis* et les espèces *Stenobracon rufus*, *Psilochalsis soudanensis* et *Sturmiopsis parasitica* recouvrées sur les larves de *C. ignefusalis*. De nombreux parasitoïdes des foreurs de tiges ont été répertoriés en Afrique (Gahukar, 1981; Van Achterberg et Walker, 2000; Assefa *et al.*, 2010; Moolman *et al.*, 2013; Mutamiswa *et al.*, 2017), mais seulement une quinzaine d'espèces ont été mentionnées au Sénégal en association avec les foreurs de tiges des céréales cultivées (Gahukar, 1981). Il importe de noter pour la première fois au Sénégal la présence de *B. brevicornis* sur les larves *S. calamistis* et *S. rufus* et *S. parasitica* sur *C. ignefusalis*. Le parasitoïde *B. brevicornis* n'est pas nouveau dans l'écosystème du mil puisqu'il a été signalé récemment sur les larves de *H. albipunctella* (Sow *et al.*, 2018). Par contre, les genres *Stenobracon* (Euvipio) et *Bracon* ainsi que *S. parasitica* ont été déjà signalés en Afrique de l'Ouest en association avec *C. ignefusalis* (Gahukar, 1981; Youm et Gilstrap, 1993b; Youm *et al.*, 1996), en

Afrique de l'Est et australe sur d'autres espèces de lépidoptères foreurs de tiges notamment *S. calamistis* (Polaszek, 1997; Van Achterberg et Walker, 2000; Chinwada, 2002; Moolman *et al.*, 2013; Mutamiswa *et al.*, 2017). *B. brevicornis* a été l'espèce dominante dans les attaques des larves de foreurs dans les champs de mil. C'est une espèce cosmopolite et parasitoïde de nombreuses familles de lépidoptères ravageurs des denrées stockées et des cultures (Van Achterberg et Walker, 2000). Il faut également noter que l'espèce Ichneumonidae *Syzeuctus sp.*, principal parasitoïde des larves de *C. ignefusalis* en Afrique de l'Ouest (Gahukar, 1981; Youm et Gilstrap, 1993b; Youm *et al.*, 1996; Polaszek, 1997) n'a pas été recouverte au cours de cette étude, ce qui est assez surprenant. Cela serait probablement lié aux conditions mentionnées plus haut sur la sous-estimation de la population de *C. ignefusalis* mais également sur l'environnement anthropisé des milieux cultivés ainsi que la longue saison sèche qui ne favorisent pas le maintien du parasitoïde (Mutamiswa *et al.*, 2017).

Cette étude conduite au cours des saisons culturales de 2013 et 2014, a montré une incidence relativement élevée de la mineuse de l'épi comme cela a été évoqué d'ailleurs dans une étude récente au Sénégal (Thiaw *et al.* 2017) et dans de précédentes recherches en Afrique de l'ouest (Ndoye, 1979; Gahukar *et al.*, 1986a; Gahukar, 1987). En contraste avec l'incidence élevée en 2013, la densité des larves a été faible certainement en rapport avec la répartition de la pluviométrie pendant cette période. En fait, lorsque la pluviométrie est importante, elle peut réduire la densité des jeunes larves (Zalucki *et al.*, 2002) par lessivage et noyade mais également par l'effet des frottements entre épis infestés causés par les vents. A cela pourraient s'ajouter les parasitoïdes des œufs qui ont dû réduire le recrutement des larves (Ngom, 2013) mais aussi la prédation (Zalucki *et al.*, 2002). Le niveau de parasitisme de *B. hebetor* sur la mineuse de l'épi assez élevé et atteignant parfois 61% par endroit pourrait s'expliquer par la rusticité de ce parasitoïde qui est capable de se maintenir dans plusieurs milieux tels que les greniers, magasins de stockages et habitations où peuvent se trouver leurs hôtes alternatifs sur les céréales et légumineuses conservées (Ghimire et Phillips, 2010a; Saadat *et al.*, 2014). Dans des études antérieures, un niveau de parasitisme naturel de la mineuse de l'épi jusqu'à 95% due à *B. hebetor* a été noté vers la fin de saison de culture du mil (Bhatnagar, 1987; Nwanze et Harris 1992; Ba *et al.*, 2013). *B. hebetor* est l'espèce la plus fréquemment rencontrées sur les larves de la mineuse de l'épi comme cela a été rapporté précédemment au Sénégal et dans les autres pays du Sahel (Gahukar, 1981; Ndoye, 1991; Nwanze et Harris, 1992; Youm et Gilstrap, 1993a). Cependant, des études récentes dans le bassin arachidier du Sénégal font plutôt cas de l'espèce de parasitoïde *B. brevicornis* (Sow *et al.* 2018). En réalité, *B. brevicornis* pourrait être un synonyme de *B. hebetor* (Puttarudriah et Channa Basavanna, 1956). D'autres auteurs considèrent ces deux espèces comme différentes mais très proches (Van

Achterberg et Walker, 2000; Bakr *et al.*, 2014; Rukhsana et Sebastian, 2015). Une carte de tendance similaire a été notée entre les pertes en grains et l'incidence de la mineuse de l'épi. Ces pertes enregistrées n'ont pas été homogènes dans le temps et dans l'espace et ont varié globalement entre 1 et 22%. Ce qui est relativement faible compte tenu des rendements qui tournent autour de 700kg/ha en milieu paysan. Des pertes similaires (4-17%) ont été enregistrées par Thiaw *et al.* (2017) au nord du bassin arachidier du Sénégal toutefois, ces résultats sont différents des pertes de 11,7 à 50% obtenues pour le mil dans des études antérieures (Nwanze et Sivakumar, 1990; Youmet Owusu, 1998). Ces faibles pertes relatives pourraient être dues à une certaine capacité de compensation des attaques précoces des variétés comme Thialack qui cotoie les Souna dans le bassin arachidier (Thiaw *et al.* 2017; Goudiaby *et al.*, 2018). A cela s'ajouterait la régulation de la mineuse de l'épi par les parasitoïdes des larves qui ont montré une carte de tendance inversée par rapport à l'incidence et aux pertes. Selon Ndoye (1991), le niveau des dégâts de *H. albipunctella* pourrait être probablement lié à la réduction des populations du ravageur par les ennemis naturels. Cette étude a aussi montré que dans le centre sud du bassin arachidier, les producteurs effectuent un semis précoce (1-7 jours après la première pluie utile) et une rotation du mil avec l'arachide. Compte tenu de la pluie qui constitue un facteur limitant dans cette zone, généralement, les producteurs sèment très tôt pour minimiser les risques de pertes de production (Nwanze, 1989; Chinwada, 2002). En ce qui concerne les foreurs de tiges, l'incidence a été plus élevée dans les parcelles avec labour, rotation et semis tardif contrairement aux parcelles avec semis précoce qui ont enregistré des incidences faibles. Le labour et le semis précoce permettent généralement de réduire les populations de foreurs de tiges tel que *S. calamistis* (Van Den Berg *et al.*, 2000; Kfir *et al.*, 2002). Ainsi, le semis tardif pourrait expliquer l'incidence élevée des foreurs de tiges (Gebremamlak *et al.*, 1989; Nwanze, 1991; Youm *et al.*, 1996). Pour la mineuse de l'épi, le niveau d'infestation et les pertes en grains estimées ou observées dans les parcelles ne semblent pas être liés au labour, à la rotation et à la date de semis. En réalité, en milieu paysan le grattage est souvent pris comme labour et en tant que tel c'est un travail du sol qui ne permet pas de réduire les populations d'insectes diapausants comme pour le labour proprement dit (Gahukar, 1990; Kfir *et al.*, 2002). Ce genre de travail du sol est plutôt destiné à créer des lits de semis et à favoriser une bonne rétention en eau et une bonne levée des cultures. Dans cette étude, la rotation ne semble pas jouer un rôle important dans la réduction des foreurs de tiges. Ce qui est logique dans la mesure où les larves diapausantes restent dans la chaume qui est souvent brûlée lors du nettoyage et débroussaillage des parcelles. Les sources d'infestation proviennent souvent des résidus de récolte non incinérés ou utilisés sous forme de palissade au niveau des concessions (Van Den Berg *et al.*, 2000). Par contre, la mineuse de l'épi dont les larves se nymphosent dans le sol constitue une

source d'infestation locale à éviter lors de semis ultérieurs du mil. Ce qui serait le cas pour les parcelles où la rotation a été effectuée (Gahukar *et al.*, 1986a). Le semis tardif aurait dû permettre de réduire les dégâts *H. albipunctella* sur le mil (Youm et Gilstrap, 1993b). Toutefois, dans cette étude, aucune différence significative n'a été notée entre les semis précoces et tardifs pour les pertes de rendement estimées. La configuration de l'hivernage marquée par des pauses pluviométriques a dû favoriser la coïncidence entre le pic de population des femelles et les stades favorables à la ponte aussi bien pour les semis précoces et tardifs.

## Conclusion

Cette étude a révélé globalement une distribution spatiale agrégative pour les larves de foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi dans les parcelles de mil au niveau de la zone centre sud du bassin arachidier. Ceci caractérise un niveau de pression des facteurs de mortalité moins élevée sur le stade larvaire de ces ravageurs au cours de cette étude. L'impact des foreurs de tiges en termes d'incidence et de densité de larves a été faible en rapport avec l'abondance réduite de leurs populations en parti liée aux pauses pluviométriques qui ont marqué la saison culturale d'une année à l'autre. Les foreurs de tiges rencontrés incluaient *C. ignefusalis*, *E. saccharina*, *B. fusca* et *S. calamistis* qui a été l'espèce prédominante. Il se serait adapté sur le mil compte tenu du fait que ces autres céréales hôtes sont moins cultivées dans la zone. La régulation de ces foreurs de tiges par les parasitoïdes a été également faible, liées notamment à la faible densité de foreurs dans le milieu. Les parasitoïdes de foreurs de tiges rencontrés étaient *S. rufus*, *P. Soudanensis*, *S. parasitica* rencontrés sur *C. ignefusalis* et *B. brevicornis* qui a été plus abondant et recouvert essentiellement sur *S. calamistis*. L'incidence de la mineuse de l'épi a été relativement élevée. Par contre, une faible densité des larves et des pertes en grains estimées ont été notées. Un parasitisme relativement faible des larves de *H. albipunctella* dû essentiellement à *B. hebetor* a été observé. Globalement, l'incidence, la densité, le parasitisme des insectes ainsi que les pertes en grains dues à la mineuse de l'épi ont été variable selon les parcelles et les saisons. Il s'est révélé aussi un fort potentiel de régulation naturel des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi par les parasitoïdes braconidae. En outre, il est apparu que les pratiques culturales en termes de travail du sol, rotation culturale et de semis précoce ou tardif ont des effets variables sur l'incidence, la densité des larves et les pertes en grains.

## CHAPITRE 5

# Evaluation de la Résistance des Variétés de Mil aux Foreurs de Tiges et à la Mineuse de l'Epi

### Introduction

Les foreurs de tiges et la chenille mineuse de l'épi du mil sont les principaux insectes ravageurs du mil en particulier au Sénégal, où ils peuvent occasionner jusqu'à 100% de pertes en rendement grains (Gahukar *et al.*, 1986a; Youm et Owusu, 1998; Drame-Yaye *et al.*, 2003). L'utilisation des variétés de mil sensibles aux insectes ravageurs contribue particulièrement à cette situation car c'est l'une des principales causes de l'explosion des populations d'insectes ravageurs (Sarao et Mahal, 2012). Il est donc indispensable de trouver une alternative pour réduire les dégâts dus à ces principaux insectes ravageurs au champ.

L'utilisation de variétés améliorées résistantes ou tolérantes aux ravageurs constitue une première ligne de défense en particulier dans le cadre d'une gestion intégrée des ravageurs, mais aussi une des méthodes de lutttes alternatives moins onéreuses et respectueuses de l'environnement (Sharma, 1987; Gray *et al.*, 2009). Malgré l'importance de l'utilisation de plantes hôtes résistantes aux insectes ravageurs, la recherche dans ce sens est assez limitée au Sénégal surtout concernant le mil. Les seules informations existantes sur les sources de résistances du mil aux principaux insectes ravageurs sont basiques et n'ont pas été actualisées depuis les années 80 (Gupta, 1986; Ndoye *et al.*, 1986; Gahukar, 1987).

La mise au point d'un système de gestion intégrée efficace contre les principaux insectes ravageurs du mil au Sénégal nécessite l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes. Cette étude a été conduite dans cette optique, avec comme objectif principal d'identifier une source de résistance aux foreurs de tiges et à la mineuse de l'épi du mil dans de nouvelles variétés pour une intégration dans un système de gestion intégrée durable.

### 5.1. Matériels et méthodes

#### 5.1.1. Site expérimental

L'étude a été conduite à la station de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherche Agricole (ISRA) de Nioro du Rip (13°45' N 15°48'W, altitude 28 m) au cours des saisons culturales de 2014 et 2015. Le site se trouve dans le bassin arachidier qui est la principale zone de culture du mil caractérisée par une assez forte pression d'insectes ravageurs en particulier.

### **5.1.2. Matériel végétal**

Les variétés Gawane, ISMI9507 et Thialack2 développées au Centre national de recherches agronomiques de l'ISRA ont été évaluées dans cette étude. Il s'agit de nouvelles variétés de mil récemment homologuées au Sénégal. Pour l'évaluation de ces variétés à la mineuse de l'épi les variétés IBV8004 et Souna3 ont été utilisées comme témoins résistants et sensibles respectivement (Gupta, 1986). Pour les foreurs de tiges, la variété Souna 3 généralement cultivée en milieu paysan a été également utilisée comme témoin local.

### **5.1.3. Dispositif expérimental**

Un dispositif en bloc complet randomisé (BCR) des variétés évaluées avec trois répétitions a été utilisé (ANNEXE 2). Chaque répétition a été constituée de 5 traitements ou parcelles élémentaires représentant les différentes variétés testées. Les parcelles élémentaires étaient de dimensions 11,5x11,5m avec des écartements de 90cm entre les lignes et entre les poquets (ANNEXE 2).

### **5.1.4. Pratiques culturales**

Un semis en humide a été réalisé après la première pluie utile en raison de 6 grains par poquet. Le démariage été effectué à trois plants une semaine après semis soit à une densité de plantation de 36 000 plants/ha. Un épandage de 150 kg/ha d'engrais NPK (15-15-15) a été effectué après le démariage. L'urée a été également épandue en deux tranches à la dose de 50 kg/ha deux semaines après la levée et deux semaines plus tard après le premier épandage.

### **5.1.5. Echantillonnage et paramètres observés**

L'échantillonnage des foreurs de tiges a été effectué aux stades de montaison, d'épiaison, de remplissage laiteux-pâteux et de maturité complète du mil à la fréquence d'une observation par stade. A chaque date d'échantillonnage, 5 poquets ont été choisis au hasard dans les différents traitements. Sur chaque poquet échantillonné, le nombre de tiges saines et attaquées, le nombre de trous et le nombre de cœurs morts ont été comptés. Ensuite, les tiges présentant des trous ont été découpées et ramenées au laboratoire pour incubation et dissection un mois plus tard afin d'identifier les espèces.

Quant à la chenille mineuse de l'épi, les échantillonnages ont été effectués pendant les stades d'épiaison, de floraison, de remplissage laiteux-pâteux et de maturité complète du mil. Comme pour les foreurs de tiges une observation par stade a été effectuée au cours de laquelle 5 poquets ont été également échantillonnés dans les différents traitements. Sur chaque poquet, le nombre d'épis sains et minées, le nombre de larves ainsi que le nombre et la longueur des galeries ont été notés.

A la maturité, les épis de l'ensemble des parcelles élémentaires ont été récoltés, battus et les graines pesés. Les paramètres poids totaux et poids mille grains ont été enregistrés.

### 5.1.6. Estimation des variables

#### 5.1.6.1. Incidence des insectes

L'incidence des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi a été déterminée à partir de la formule 3.8.

$$I (\%) = \frac{Pi}{Pt} \times 100 \quad (3.8)$$

Où  $I$  = incidence ;  $Pi$  = nombre de plants infestés par les foreurs ou la mineuse ;  $Pt$  = nombre total de plants échantillonnés.

#### 5.1.6.2. Pertes de rendement en grain

Les pertes de rendement en grains ont été calculées sur la base des dégâts de la mineuse de l'épi. Les pertes ont été déterminées à l'aide de la méthode de Jago (1993b) basée sur le nombre de galerie par épi et leur classement en catégories de 1 à 3 où 1 = 1 galerie; 2 = 2-3 galeries et 3 = 4 galeries et plus. Basé sur ces catégories, l'ensemble des épis échantillonnés ont été regroupés en 3 classes de pertes en grains suivant une échelle de notation avec 1 = 1g de grain perdu, 2 = 2,5g et 3 = 4g. Les pertes ont été calculées suivant la formule :

$$Perte \text{ en grain } (\%) = \frac{PGT (kg)}{PT (kg)} \times 100 \quad (4.1)$$

Où  $PGT$  est le poids en grain perdu dans chaque traitement et  $PT$  est le poids total en grains récolté par traitement.

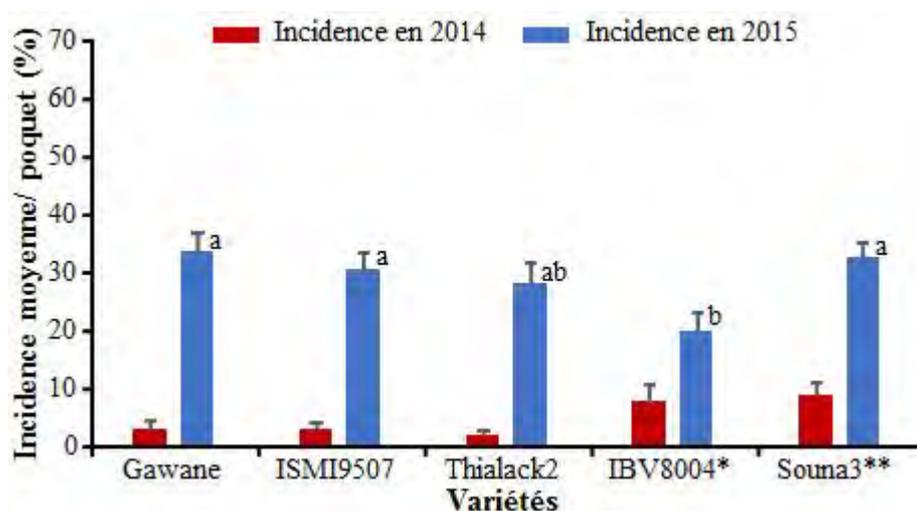
#### 5.1.7. Analyse des données

Les moyennes et les écarts types des différentes variables ont été calculés avec le logiciel SAS 9.1. et soumis à l'analyse de la variance (ANOVA) à l'aide de la procédure linéaire générale «GLM». La comparaison des moyennes a été effectuée avec le test de Student Newman Keuls au seuil de probabilité  $\alpha = 0,05$ . Les données de l'incidence, les cœurs morts et les pertes en grains ont été préalablement transformées à l'aide de la formule arcsine  $\sqrt{X + 0.5}$  tandis que le nombre de larves, de galeries, la longueur des galeries et le nombre de trous ont été transformés grâce à la formule  $\log_{10}(X + 1)$  où  $X$  étant la variable considérée (SAS, 2003; McDonald, 2009).

## 5.2. Résultats

### 5.2.1. Incidence des foreurs de tiges

En 2014, l'incidence des foreurs de tiges a été faible ( $2\pm 1\%$  -  $9\pm 2\%$  de tiges infestées) sans différence significative entre les variétés (Figure 37). L'incidence a été plus importante en 2015 entre  $20\pm 3\%$  et  $33\pm 3\%$  de tiges infestées. Pendant cette saison, la variété Thialack2 a été moyennement attaquée avec  $28\pm 4\%$  des plants infestés comparativement au témoin local Souna3 et aux variétés ISMI9507 et Gawane qui ont enregistré entre  $31\pm 3\%$  et  $33\pm 3\%$  de plants infestés. La variété IBV8004 a été significativement moins attaquée ( $F_{4,15} = 3,28$  ;  $P < 0,05$ ) avec  $20\pm 3\%$  de plants infestés en comparaison avec les autres variétés (Figure 37).



**Figure 37:** Incidence moyenne ( $\pm$ écart-type) des foreurs de tiges sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de 2014 et 2015.

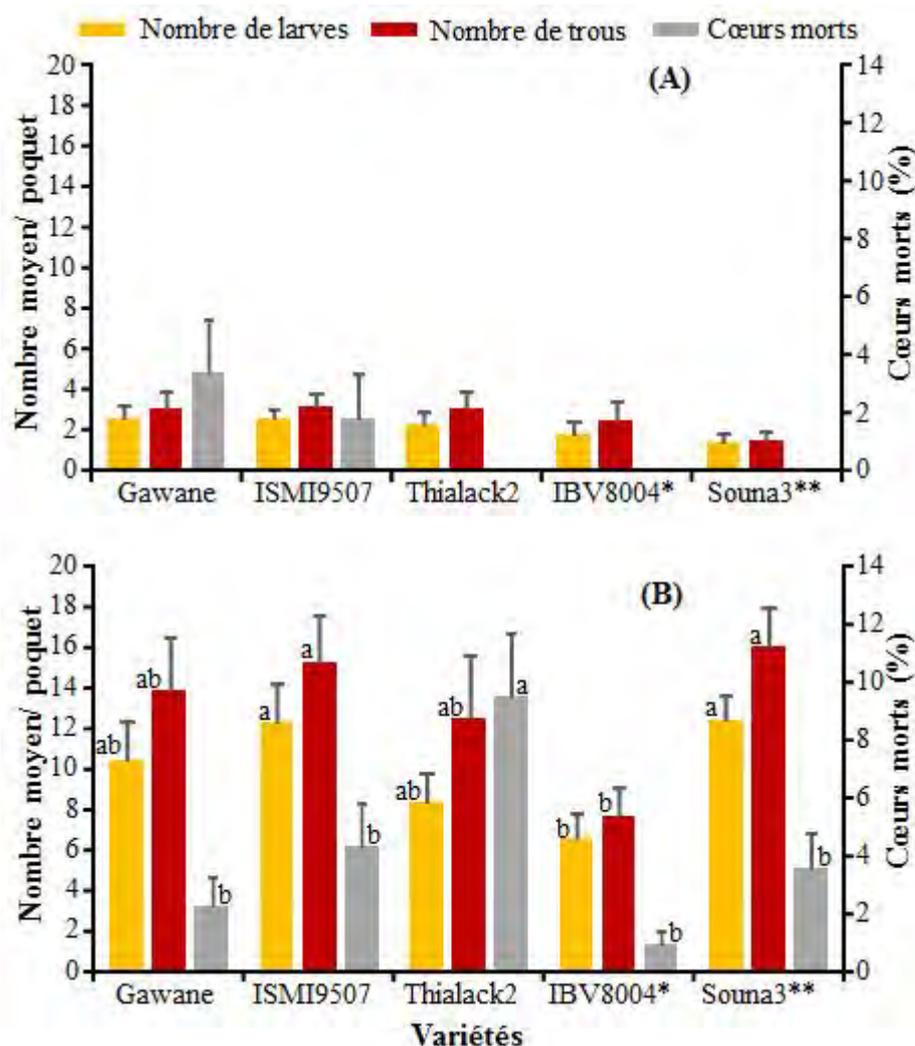
**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

\*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

### 5.2.2. Densité des larves et dégâts des foreurs de tiges

La densité moyenne des larves de foreurs et les dégâts liés aux nombre de trous et au pourcentage de tiges mortes, c'est-à-dire "cœurs" morts ont été variables pour les deux années d'étude et très faibles en 2014 en comparaison avec 2015 (Figure 38). En 2014, les plants ayant des couronnes ou fouets morts ont été observés uniquement au niveau des variétés ISMI9507 et Gawane avec de très faibles niveaux de mortalité des tiges estimée à près de 3% des poquets échantillonnés. Toutefois, aucune différence significative n'a été notée entre les variétés pour la densité des larves, le nombre de trous et le pourcentage de cœurs morts (Figure 38 a). Par contre, en 2015, le nombre de larves de foreurs de tiges et de trous ont été plus importantes pour toutes les variétés. Les variétés Thialack2 et Gawane ont enregistré un nombre de larves par poquet variant de  $8,40\pm 1,46$  à  $10,40\pm 1,85$  ainsi qu'un nombre de tiges trouées par poquet compris entre  $12,40\pm 3,13$  et

13,80±2,62 ( $F_{4,75} = 2,81$  ;  $P < 0,05$ ) ce qui est relativement faible en comparaison avec le témoin local Souna3. La densité des larves par poquet et le nombre de trous respectifs par poquet de 6,53±1,19 et 7,60±1,39 ont été plus faibles ( $F_{4,75} = 3,28$  ;  $P < 0,05$ ) pour IBV8004 comparativement aux différentes variétés. Concernant la mortalité des plants pendant cette période, la variété Thialack2 a enregistré en moyenne 9% de plants ayant des fouets morts, ce qui est plus élevé ( $F_{4,75} = 5,61$  ;  $P < 0,05$ ) que pour le témoin local Souna3 et les variétés ISMI9507, Gawane et IBV8004 qui ont présenté des dégâts statistiquement similaires (Figure 38 b).



**Figure 38:** Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves et de trous de foreurs de tiges et pourcentage moyen ( $\pm$ écart-type) de cœurs morts sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015.

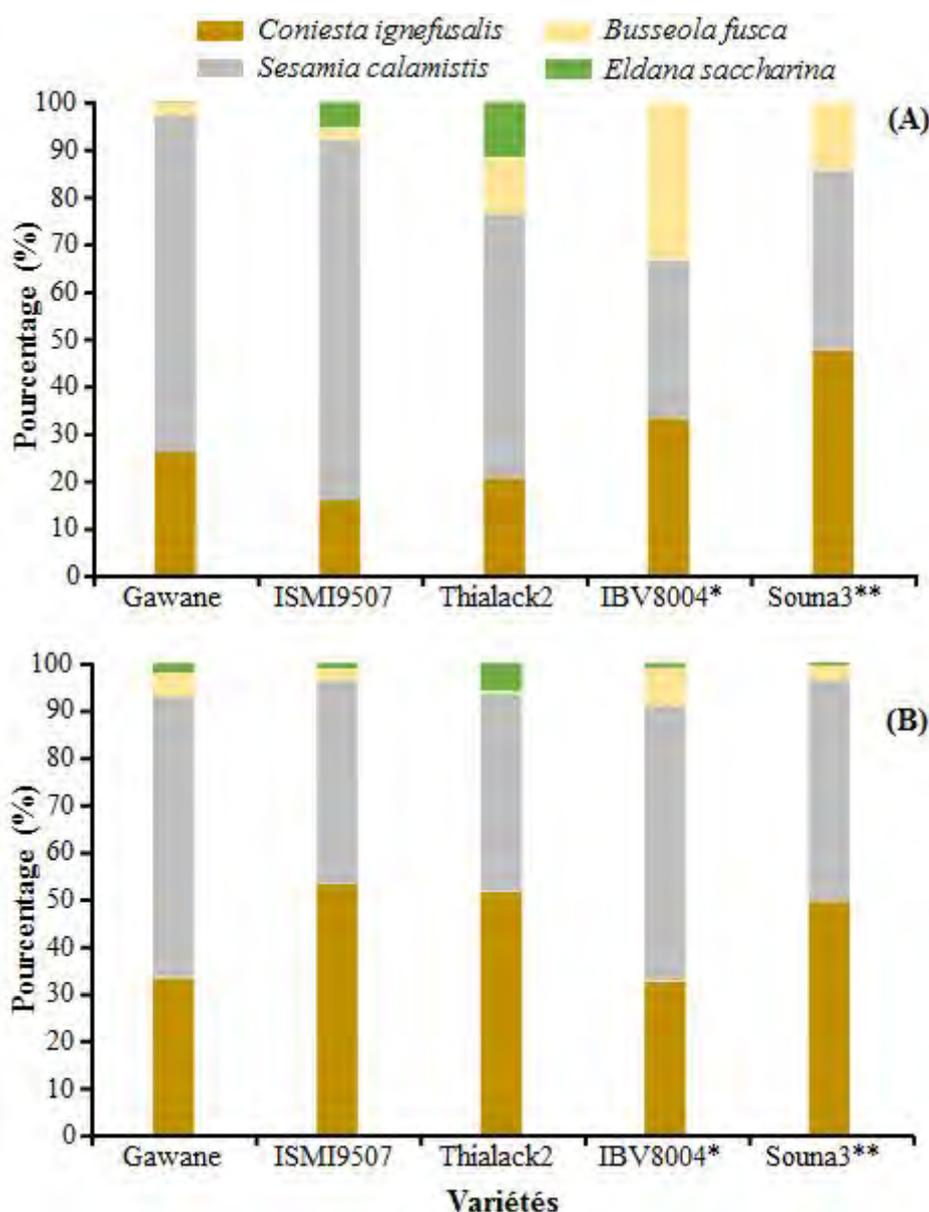
**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

\*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

### 5.2.3. Composition des foreurs de tiges

Le foreur de tiges du mil, *Coniesta ignefusalis*, le foreur rose du maïs, *Sesamia calamistis*, le foreur des tiges de maïs, *Busseola fusca* et le foreur de la canne à sucre, *Eldana saccharina* ont été les

principales espèces interceptées (Figure 39). *S. calamistis* et *C. ignefusalis* étaient les plus représentées dans les échantillons au cours des deux années d'étude avec 31 - 72% et 16 - 53% respectivement (Figure 39).



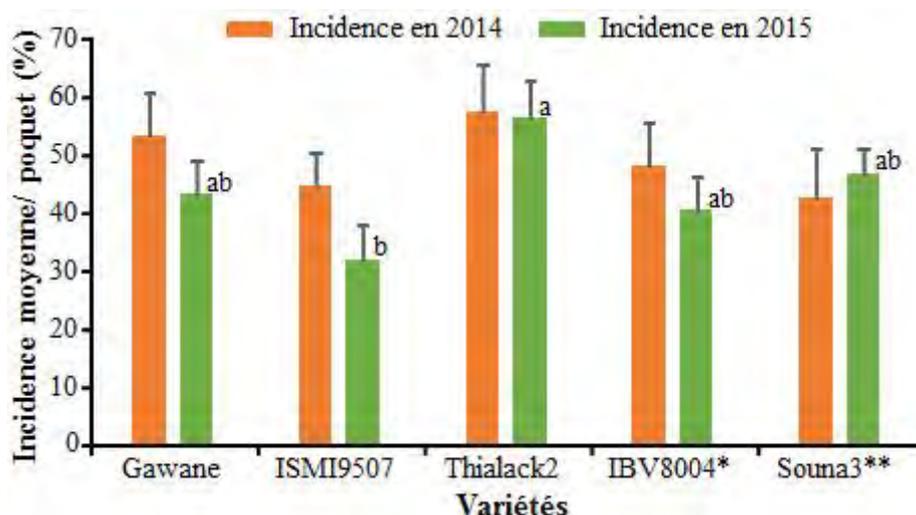
**Figure 39:** Composition des insectes foreurs de tiges interceptés sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015.

NB: \*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

#### 5.2.4. Incidence de la mineuse de l'épi

L'incidence de la mineuse de l'épi a varié en 2014 entre  $42 \pm 9\%$  et  $58 \pm 8\%$  sans aucune différence significative entre les variétés (Figure 40). En revanche en 2015, les variétés ont réagi de façon différente. L'incidence de la mineuse a varié entre  $32 \pm 6\%$  et  $56 \pm 7\%$  d'épis minés et a été significativement faible ( $F_{4,15} = 2,42$  ;  $P < 0,05$ ) sur la variété ISMI9507, comparativement au témoin résistant IBV8004 et aux variétés Gawane et Souna3 dont les attaques ont été comprises

entre 41±6% et 47±4%. La variété Thialack2 a enregistré l'incidence de la mineuse la plus importante (Figure 40).



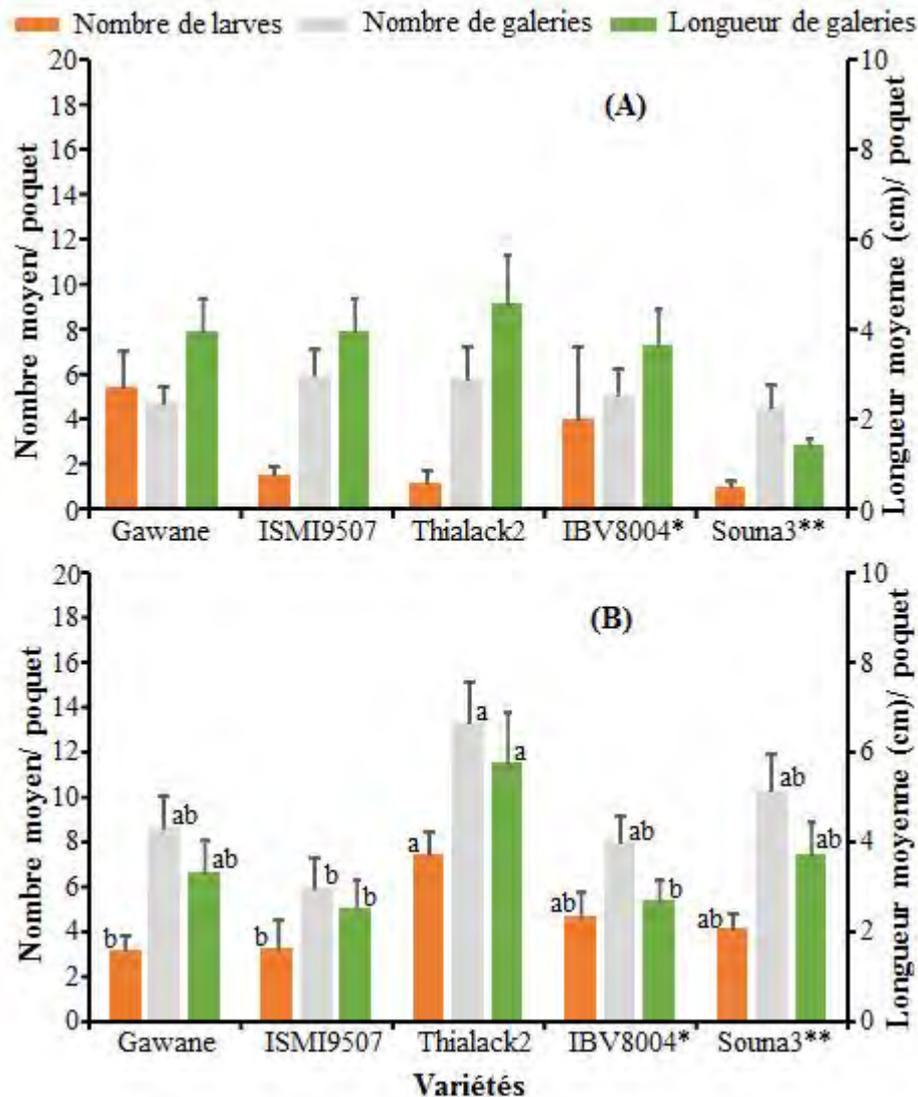
**Figure 40:** Incidence moyenne ( $\pm$ écart-type) de la mineuse de l'épi sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de 2014 et 2015.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

\*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

### 5.2.5. Densité des larves et dégâts de la mineuse de l'épi

Les infestations de la chenille mineuse de l'épi du mil ont été plus importantes en 2015 comparativement à la saison 2014 (Figure 41). En 2014, aucune différence n'a été observée entre les variétés pour les paramètres, nombre de larves, nombre de galeries ainsi que la longueur des galeries (Figure 41 a). En revanche en 2015, la variété Thialack2 a enregistré significativement plus de larves de la mineuse de l'épi ( $6,87 \pm 0,97$  larves/poquet ;  $F_{4,75} = 3,57$ ;  $P < 0,05$ ), de galeries ( $13,27 \pm 1,87$  galeries/poquet ;  $F_{4,75} = 3,47$ ;  $P < 0,05$ ) et de plus longues galeries ( $5,75 \pm 1,14$  cm ;  $F_{4,75} = 2,89$ ;  $P < 0,05$ ) que les autres variétés (Figure 41 b). Le nombre de larves, le nombre et la longueur des galeries ont été significativement moins importants sur la variété ISMI9507 comparativement au témoin résistant IBV8004 avec respectivement  $3,20 \pm 1,32$  larves/poquet,  $5,87 \pm 1,38$  galeries/poquet et  $2,49 \pm 0,67$  cm de longueur de galerie. La variété Gawane a été aussi endommagé que le témoin sensible Souna3 (Figure 41 b).



**Figure 41:** Nombre moyen ( $\pm$ écart-type) de larves de la mineuse et de galeries et longueur moyenne ( $\pm$ écart-type) des galeries sur les différentes variétés au cours des saisons culturales de A) 2014 et B) 2015.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ).

\*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

### 5.2.6. Rendement et perte en grains

Le rendement grains des différentes variétés a été plus important en 2015 contrairement au poids mille grains qui a été plus élevé en 2014 (Tableau 6). Les pertes en rendement grains ont été relativement faibles pendant les deux saisons mais légèrement plus importantes en 2014. Quelle que soit l'année, aucune différence significative n'a été observée entre les variétés aussi bien pour les rendements grains que les pertes et le poids 1000 grains (Tableau 6).

**Tableau 6:** Paramètres de rendement et pertes sur les différentes variétés au cours des hivernages de 2014 et 2015

Saisons hivernales	Variétés	Moyenne± ET		
		Poids mille grains (g)	Rendement (t/ha)	Perte de rendement (%)
2014	Gawane	11,27±0,33	1,50±0,14	3,64±0,46
	ISMI9507	10,96±0,26	1,40±0,09	4,24±0,59
	Thialack2	10,33±0,28	1,83±0,31	3,40±0,69
	IBV8004*	10,77±0,25	1,47±0,14	3,45±0,29
	Souna3**	10,66±0,49	1,54±0,17	3,50±0,43
2015	Gawane	8,71±0,42	1,70±0,23	2,90±1,12
	ISMI9507	7,73±0,04	1,62±0,11	2,25±0,61
	Thialack2	7,62±0,28	1,86±0,01	3,80±0,43
	IBV8004*	8,07±0,11	1,94±0,46	2,26±0,14
	Souna3**	7,75±0,15	2,31±0,24	2,37±0,38

**NB :** \*Témoin résistant; \*\*Témoin sensible.

### 5.3. Discussion

Pour l'ensemble des paramètres observés en 2014, le comportement est le même chez l'ensemble des variétés testées. Une variabilité des paramètres observés a été notée d'une saison de culture à l'autre, ce qui pourrait être lié à la faible population de ravageurs et la pluviométrie erratique en 2014 en comparaison avec l'hivernage 2015. Selon certains auteurs, les attaques des insectes varient considérablement selon les années et dépendent de l'instabilité du climat des zones cultivées, du cycle des variétés et de la densité des insectes. (Touré et Yéhouéno, 1995; Lale et Sastawa, 2000; Goudiaby, 2012). Pendant les deux années de l'étude, l'incidence des foreurs a été moins importante que celle de la mineuse de l'épi. Les attaques de la mineuse sont en général plus importantes sur la culture du mil (Nwanze, 1991).

Compte tenu de l'incidence moyenne, du nombre moyen de larves et de trous des foreurs relativement faibles sur Thialack2 en 2015 comparativement au témoin local Souna3, cette variété pourrait disposer d'une source de résistance aux foreurs. Etant donné que *S. calamistis* dont les attaques sont généralement tardives a été le foreur de tige le plus abondant, la maturité précoce de Thialack2 pourrait jouer un rôle important dans les mécanismes de résistance d'autant plus que son pedigree ne montre aucune parenté avec Souna3. En particulier pour les foreurs, les attaques sont généralement plus faibles sur les variétés précoces que sur les variétés tardives (Nwanze, 1989; Nwanze et Harris, 1992). Malgré l'incidence élevée des foreurs sur Gawane, la densité moyenne des larves et le nombre moyen de trous ont été également faibles par rapport au témoin local. L'importance de la pubescence au niveau des feuilles de cette variété pourrait constituer une barrière à la ponte, mais également au développement des jeunes larves de foreurs avec notamment

la présence des trichomes qui souvent induit une résistance physico-chimique aux insectes (Nwanze et Harris, 1992; Khan, 1997). Ceci expliquerait surtout la faible densité de larves de foreurs, mais également des trous sur la variété Gawane (Kumar, 1997; Sarao et Mahal, 2012; Singh *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2013). Les faibles densités de larves de foreurs rencontrées sur Thialack2 et Gawane pourraient également être liées aux propriétés chimiques (Singh *et al.*, 2012) de ces variétés étant donné que les mêmes observations ont été notées sur la variété de mil Zongo qui secrète un liquide gluant qui noie les larves (ISRA, 1979; Ndoye *et al.* 1986). En outre, sur les céréales, les cœurs morts sont également causés par la mouche des jeunes pousses, *Atherigona soccata*, Rondani (Diptera: Muscidae) qui attaque les jeunes semis. Cela expliquerait pourquoi Sarao et Mahal (2012) ont trouvé une corrélation hautement significative entre la hauteur des plants et le pourcentage de cœurs morts. L'abondance élevée de *S. calamistis* par rapport aux autres espèces de foreurs de tiges corrobore les résultats obtenus par Bekoye et Dadie (2015) sur le mil en Côte d'Ivoire. Toutefois, ces observations sont différentes aux nombreuses études qui trouvent *C. ignefusalis* dominante sur le mil en Afrique de l'Ouest (Nwanze et Harris, 1992; Harris et Youm, 2000; Kfir *et al.*, 2002). Par contre, *B. fusca* et *E. saccharina* sont rares sur la culture du mil (Nwanze, 1997; Kfir *et al.*, 2002; Matama-Kauma *et al.*, 2002; Tounou *et al.*, 2013).

Par rapport à la variété Thialack2, son rendement a été relativement meilleur que celui de toutes les autres variétés testées malgré les dégâts élevés enregistrés pour la mineuse de l'épi et le pourcentage élevé de cœurs morts dû aux foreurs de tiges. Les épis longs et compacts de cette variété ont été probablement à l'origine de la compensation des attaques précoces de la mineuse de l'épi (Vercambre, 1978). En ce qui concerne les foreurs de tiges, les attaques ont dû être compensées par la production de talles supplémentaires généralement induite par les attaques précoces comme dans le cas de la réaction du sorgho lors des infestations de *B. fusca* (Van Den Berg *et al.*, 1994). En effet, la formation de cœurs morts et la hauteur des plants pendant la saison des pluies ont un effet positif direct sur le rendement. Toutefois, selon Singh *et al.*, (2012), la formation de talles supplémentaires et leur capacité à produire des grains dépendent de la période d'infestation, du niveau des infestations mais aussi de la disponibilité de l'eau et des nutriments dans le sol. Pour la variété ISMI9507, l'incidence de la chenille mineuse, la densité des larves et les dégâts plus faibles en 2015 dénoteraient d'une source de résistance aux attaques de la mineuse due certainement à la morphologie de l'épi ou à la précocité, empêchant un établissement des jeunes larves (Sharma, 1987; Ndoye et Gahukar, 1987). Les faibles rendements notés en 2014, malgré les faibles attaques de la mineuse, pourraient être liés au stress hydrique survenu après le semis, dû à la répartition de la pluviométrie au cours de cette année. D'autres facteurs tels que les meloidae (Lale et Sastawa, 2000) ont dû également contribuer aux rendements relativement bas

des variétés testées par rapport au potentiel de 2 à 3 t/ha. En outre, les poids mille grains faibles des variétés en 2015 contrairement à la saison de 2014 seraient dus aux attaques élevées des foreurs de tiges qui induisent l'avortement des épis lorsque le pourcentage de trous sur les tiges augmente (Bosquez-Perez et Schulthess, 2000).

### **Conclusion**

Cette étude a permis d'identifier chez les variétés Gawane et Thialack2 la possibilité de disposer d'une source de résistance aux foreurs de tiges. La variété Thialack2 aurait également développé une tolérance aux dégâts de la mineuse de l'épi ayant permis de minimiser les pertes. En outre, ISMI9507 aurait aussi une source de résistance à la mineuse, même si le rendement reste faible, comparé au potentiel de la variété. Cependant, une grande variabilité a été notée concernant la performance des variétés évaluées dans le temps en raison de l'évaluation en condition d'infestation naturelle.

## CHAPITRE 6

### Identification de la Période Optimale de Lâchers Augmentatifs de *Bracon hebetor* pour la Lutte Biologique contre la Mineuse de l'Épi du Mil

#### Introduction

La lutte biologique avec l'utilisation des ennemis naturels tels que les parasitoïdes (Smith, 1996; Van Lenteren, 2012; Ghimire et Phillips, 2014) est adoptée de nos jours en substitution aux produits chimiques de synthèse néfastes pour l'environnement et largement utilisés pour lutter contre les insectes ravageurs (Van Den Berg et Nur, 2000; Calvet *et al.*, 2005; Jepson, 2009; Leslie, 2009; Gueye *et al.*, 2012; Saha et Mukhopadhyay, 2013).

Dans le cadre de la gestion intégrée, la lutte biologique joue un rôle significatif à cause notamment de ses avantages sur la lutte chimique, mais également sa compatibilité avec les autres méthodes de lutte contre les ravageurs notamment la lutte culturale et la résistance variétale (O'Neil et Obrycki, 2009). Près de 230 espèces d'ennemis naturels ont été évaluées pour leur utilisation dans les programmes de lâchers augmentatifs, particulièrement pendant ces 30 dernières années et commercialisées présentement à travers le monde (Van Lenteren, 2012). En zone sahélienne y compris le Sénégal, le parasitoïde *B. hebetor* constitue un agent biologique potentiel pour la lutte contre la mineuse de l'épi (Bathnagar, 1987; Ba *et al.*, 2013; Baoua *et al.*, 2014; Kabore *et al.*, 2017) à cause notamment de sa réponse aux densités de population élevées de ses hôtes, son taux élevé de reproduction et sa courte durée de développement (Youm et Gilstrap, 1993a; Amir-Maafi et Chi, 2006; Adarkwah *et al.*, 2010; Saxena *et al.*, 2012). C'est un ectoparasitoïde grégaire et cosmopolite qui attaque plusieurs lépidoptères nuisibles des grains stockés et des cultures céréalières (Milonas, 2005; Akinkurolere *et al.*, 2009; Ghimire et Phillips, 2010a;). Toutefois, en milieu paysan, les mortalités élevées de la mineuse de l'épi dues à *B. hebetor* ne sont notées qu'à la fin de la saison de culture après que les dégâts ont été occasionnés (Bhatnagar, 1987; Nwanze et Harris, 1992). Des tests de lâchers augmentatifs de *B. hebetor* au Sénégal et dans d'autres régions du Sahel tels que le Mali, le Niger et le Burkina Faso ont permis d'obtenir une mortalité significative de la mineuse jusqu'à 97% en milieu paysan (Bhatnagar, 1989; Payne *et al.*, 2011; Ba *et al.*, 2013; Ba *et al.*, 2014; Kabore *et al.*, 2017) avec une augmentation du rendement en grains d'au moins 50% (Baoua *et al.*, 2014; Amadou *et al.*, 2017).

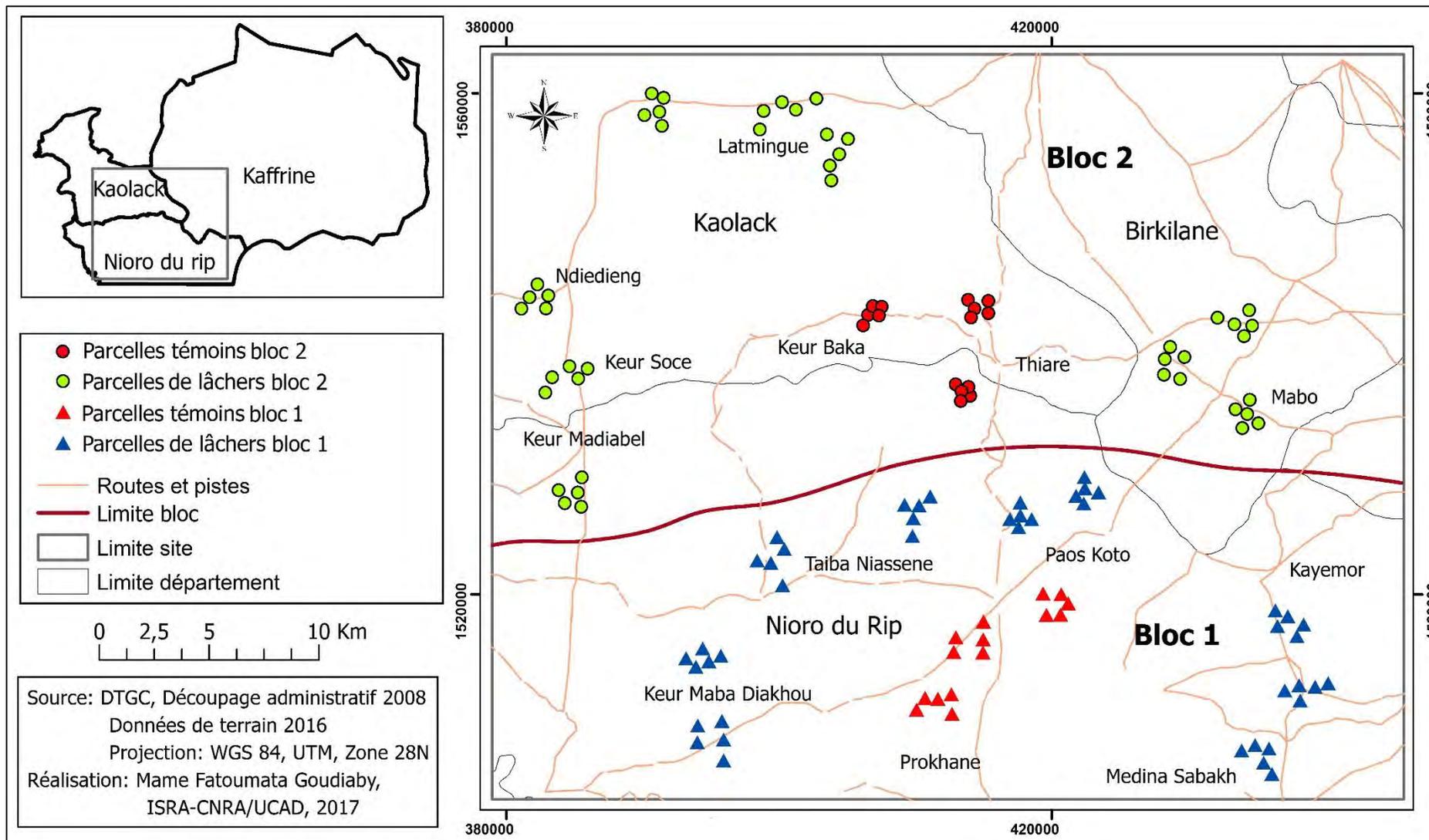
Les lâchers augmentatifs de *B. hebetor* ont jusque-là été effectués sans description précise de la période où les lâchers devraient être effectués (Bhatnagar, 1989; Ba *et al.*, 2013; Ba *et al.*, 2014).

Or l'efficacité des lâchers nécessite de les faire coïncider avec la période où les larves de la mineuse sont présentes dans les épis de mil. Cette étude s'inscrit dans ce cadre avec pour objectif de déterminer la période optimale pour les lâchers de *B. hebetor* soit en fonction du début des vols des adultes de la mineuse ou du stade de développement du mil. Ceci vise donc à affiner les techniques de lâcher augmentatif de *B. hebetor* en milieu paysan pour une meilleure efficacité du parasitoïde mais aussi pour une facilité d'application par les paysans.

## **6.1. Matériels et méthodes**

### **6.1.1. Site et choix des parcelles**

L'étude a été conduite au centre Sud du bassin arachidier pendant la saison de culture de 2016. A partir des données du découpage administratif de 2008 du Sénégal, 2 sites ou blocs distants d'au moins 20km ont été choisis dans la zone d'étude. Dans chacun des blocs, 12 points ou villages ont été choisis au hasard parmi l'ensemble des points disponibles (Figure 42).



**Figure 42:** Carte de localisation des parcelles témoins et de lâchers de *B. hebetor* dans le Sud bassin arachidier.

### **6.1.2. Elevage des insectes**

La pyrale de la farine *E. kuehniella* (Zeller) a été utilisée pour établir et maintenir une colonie de *B. hebetor*. Les deux espèces ont été collectées des stocks de mil paysans et maintenues au laboratoire en condition ambiante. Régulièrement, de nouvelles collections d'insectes ont été effectuées dans les greniers pour éviter la dégénérescence des colonies des deux espèces.

#### **6.1.2.1. Elevage *Ephestia kuehniella***

Pour l'élevage d'*E. Kuehniella*, les adultes ont été placés dans une cage en plexiglas dont la partie inférieure a été remplacée par du grillage. Les œufs pondus après accouplement sont récupérés et mis dans des boîtes de Petri (Ø15cm X 1,5cm H). Approximativement 500 œufs ont été introduits dans chaque boîte de Petri remplie d'un mélange de 1/4 de grain de mil et 1/2 de farine de mil préalablement stérilisé à 100°C au bout de 24h. Les larves ont été transférées au fur et à mesure dans des cages d'émergence avec un supplément de grains de mil de sorte à avoir 1g de nourriture par larve.

#### **6.1.2.2. Elevage *Bracon hebetor***

Les adultes de *B. hebetor* ayant émergé du mil collecté des magasins de stockage et greniers ont été placés dans une cage d'élevage en bois. La partie supérieure de la cage a été remplacée par du verre et une ouverture a été faite sur l'un des côtés et remplacée par une moustiquaire à mailles fines pour permettre les manipulations à l'intérieur de la cage. Les adultes de *B. hebetor* ont été alimentés de solution sucrée à 10% avec un coton imbibé. Pour maintenir la colonie, les larves de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> stade d'*E. kuehniella* ont été utilisées. Ainsi, des boîtes de Petri (Ø10cm X 1,5cm H) ont été utilisées et dans chacune d'elles, 20 larves ont été exposées à 2 femelles fécondées de *B. hebetor* pendant 48h. Les adultes émergeant au bout de 5 à 12 jours plus tard ont été introduits dans la cage d'élevage des parasitoïdes.

### **6.1.3. Suivi des adultes de la mineuse de l'épi**

Un piège lumineux à gaz a été installé près des champs de mil pour suivre la dynamique de vol de la mineuse pendant la période d'étude. Les observations ont été effectuées tous les jours à partir de la première pluie utile jusqu'à la maturité du mil.

### **6.1.4. Lâcher de parasitoïdes au champ**

Dans les 2 sites ou blocs constitués dans la zone d'étude, un dispositif en bloc complet randomisé (BCR) a été adopté pour les lâchés. Chaque bloc a été constitué de 4 traitements ou groupes de 3

villages et 5 répétitions ou champs. Les différents traitements étaient distants d'au moins 15km et dans chaque traitement la distance entre les villages était de 5km (Figure 42).

Dans l'un des blocs, les lâchers de *B. hebetor* ont été effectués à différentes périodes en fonction des premières captures des adultes de la mineuse de l'épi au piège lumineux. Les différents traitements consistaient à: aucun lâcher de *B. hebetor* (T0); lâcher de *B. hebetor* un mois après la première capture des adultes de la mineuse dans les pièges lumineux (T1); lâcher de *B. hebetor* effectué 2 semaines après le premier lâcher (T3); lâcher de *B. hebetor* 4 semaines après le premier lâcher (T4). Dans le second bloc, les lâchers ont été effectués à différents stades du développement du mil et les traitements consistaient à : aucun lâcher de *B. hebetor* (T0); lâcher de *B. hebetor* effectué au stade de montaison (T2); lâcher de *B. hebetor* au stade de floraison (T3); lâcher de *B. hebetor* au stade de remplissage des grains (T4).

Avant les lâchers, 20 larves d'*E. kuehniella* ont été exposées à 3 femelles et 2 mâles de *B. hebetor* pendant 48h dans des boîtes de pétri au laboratoire. Ces larves parasitées ont été mises dans des sacs en jute (15x25cm) contenant 100g de grain de mil, puis accrochés à trois (3) piquets ou points de lâcher placés dans chaque parcelle. Chaque village a été pourvu de 15 sacs de parasitoïdes soit un total de 45 sacs de parasitoïdes placés dans chaque traitement où les lâchers de *B. hebetor* ont été effectués. Les adultes émergés s'échappent à travers les mailles du sac en jute, se dispersent dans le champ et parasitent les larves de la mineuse de l'épi.

### **6.1.5. Evaluation des paramètres**

#### **6.1.5.1. Echantillonnage de la mineuse de l'épi**

Dans chaque bloc, les parcelles témoins et de lâchers ont été divisées en 4 strates dans lesquelles 3 poquets ont été échantillonnés au hasard. Sur chaque poquet échantillonné, le nombre total d'épis, le nombre d'épis minés, le nombre de larves vivantes, parasitées et/ou mortes, le nombre et la longueur des galeries ont été enregistrés.

#### **6.1.5.2. Estimation de l'incidence**

L'incidence de la mineuse a été évaluée à partir de la formule 3.8.

$$I (\%) = \frac{P_i}{P_t} \times 100 \quad (3.8)$$

où  $I$  = incidence;  $P_i$  = nombre de plants infestés par la mineuse;  $P_t$  = nombre total de plants échantillonnés.

#### **6.1.5.3. Estimation du parasitisme des larves**

Le parasitisme des larves a été estimé à partir de la formule 3.9.

$$P(\%) = \frac{NLp}{NLt} \times 100 \quad (3.9)$$

où  $P$  = taux de parasitisme ;  $NLp$  = nombre de larves parasitées ;  $NLt$  = nombre total de larves échantillonnées.

### 6.1.6. Analyse des données

Les moyennes et les écarts types des différentes variables ont été calculées à l'aide du logiciel SAS 9.1. L'analyse de la variance (ANOVA) a été également réalisée à l'aide de la procédure linéaire générale «GLM» du logiciel SAS 9.1 avec le test de Student Newman Keuls (SNK) au seuil de probabilité  $\alpha=0,05$ . Les nombres (nombre galeries, longueur galeries) et les proportions (incidence, parasitisme) ont été préalablement transformés en utilisant respectivement les formules  $\arcsine\sqrt{\frac{X}{n} + 0,5}$  et  $\log_{10}(X + 1)$  où  $X$  = variable considérée (SAS, 2003; McDonald, 2009).

## 6.2. Résultats

### 6.2.1. Dynamique des populations de la mineuse de l'épi

Les captures des adultes de mineuse de l'épi au piège lumineux ont débuté à la première semaine du mois d'août et le pic des populations a été obtenu à la quatrième semaine du mois d'août. La population a progressivement baissé au cours du mois de septembre avec un arrêt des captures à la quatrième semaine du même mois (Figure 43).

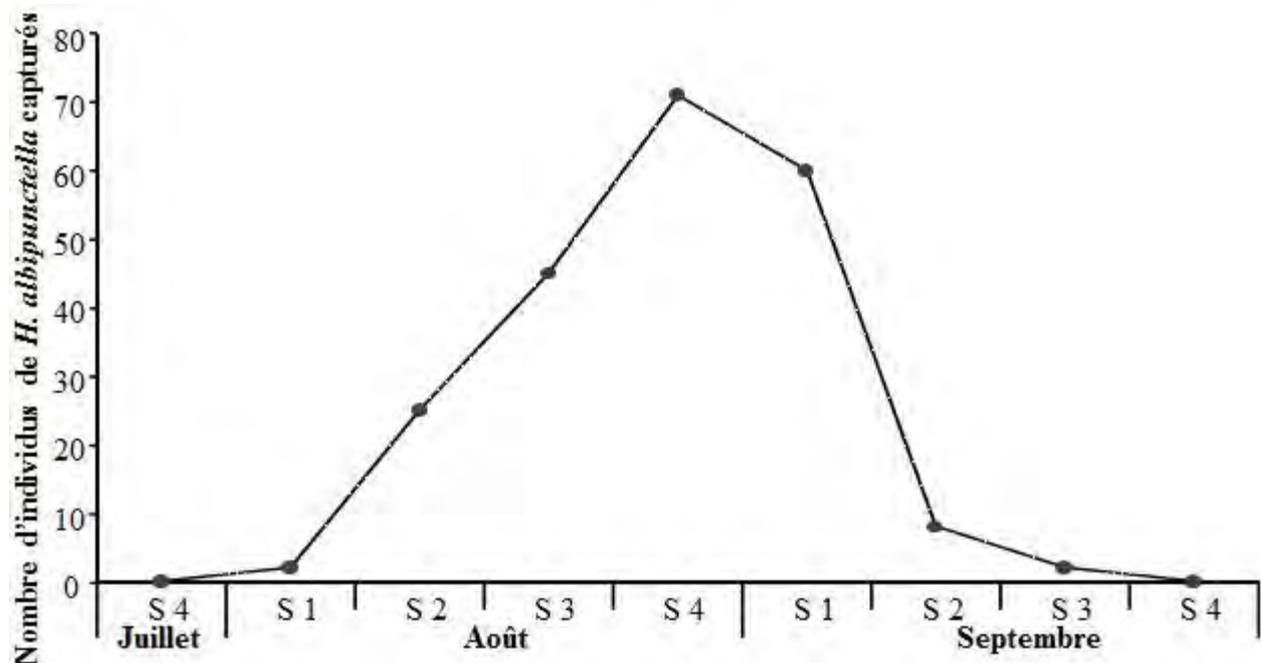
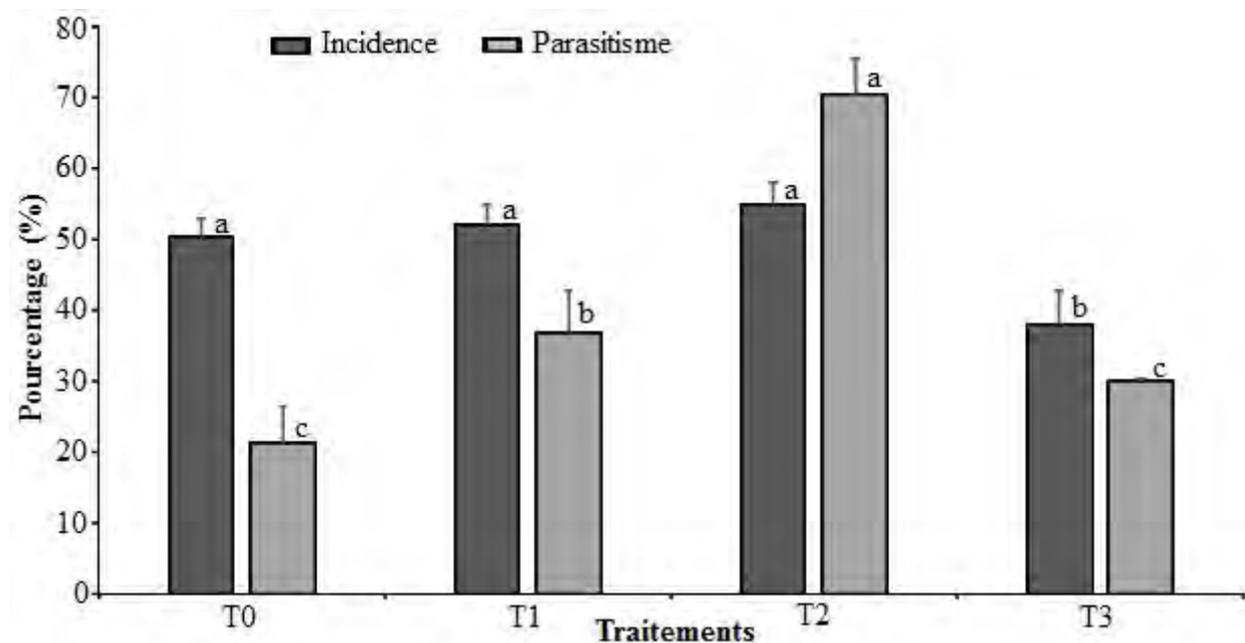


Figure 43: Dynamique saisonnière de la mineuse de l'épi dans le centre sud du bassin arachidier.

### 6.2.2. Incidence et parasitisme des larves dans le bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil

L'incidence de la mineuse a été assez élevée avec une différence significative entre les traitements. L'incidence a été plus faible ( $F_{3,239}=7,34$ ,  $P<0,0001$ ) dans le traitement T3 (4 semaines après les premiers lâchers) avec  $37,93\pm 4,87\%$  d'épis infestés en comparaison avec le témoin (T0) qui n'a pas été statistiquement distincts avec les traitements T1 (1 mois après les premiers vols de la mineuse) et T2 (2 semaines après les premiers lâchers). Parallèlement, le parasitisme des larves a été significativement élevé ( $F_{3,239}=17,08$ ,  $P<0,0001$ ) 2 semaines après les premiers lâchers (T2) avec  $70,25\pm 5,16\%$  de larves parasitées. Le parasitisme des larves de la mineuse a été moins élevé dans le traitement témoin (T0) et à 4 semaines après les premiers lâchers (T3) avec respectivement  $21,25\pm 5,09\%$  et  $30,00\pm 0,27\%$  de larves parasitées (Figure 44).



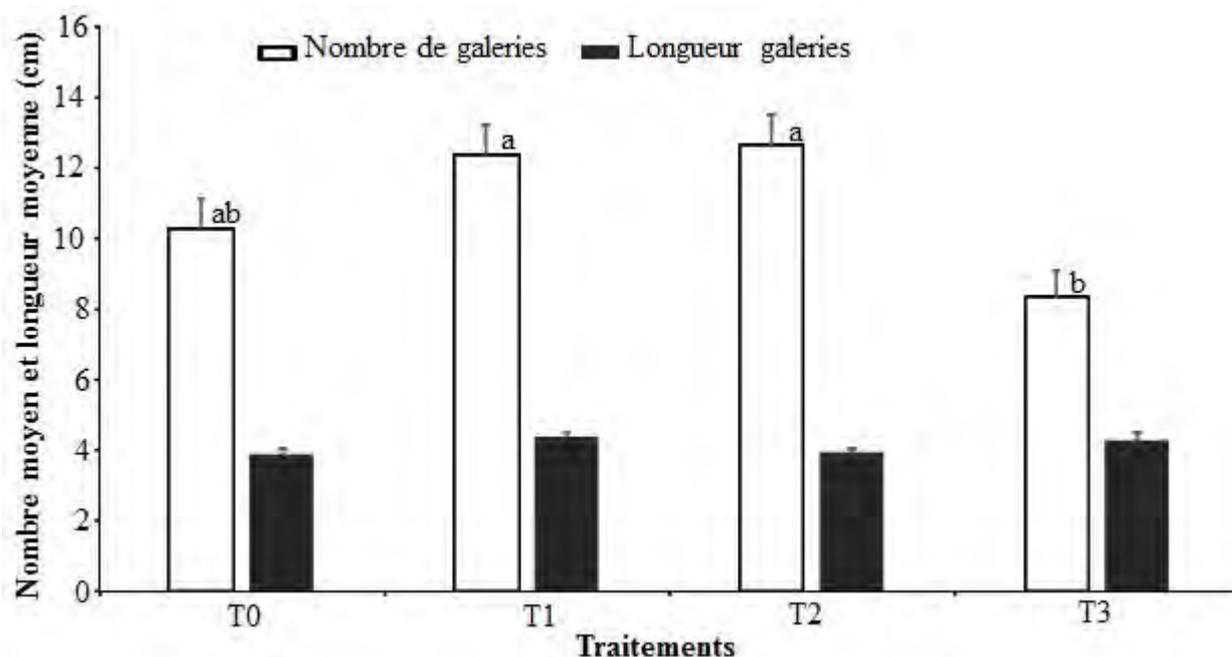
**Figure 44:** Incidence et niveau de parasitisme moyen ( $\pm$ écart-type) des larves dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil aux pièges lumineux.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ). T0= pas de lâcher; T1= lâcher un mois après la première capture de la mineuse au piège lumineux; T2= lâcher effectué 2 semaines après le premier lâcher; T3= lâcher 4 semaines après le premier lâcher.

### 6.2.3. Dégâts dans le bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil

Le nombre de galeries par poquet a été significativement différent ( $F_{3,239}=7,18$ ,  $P=0,0001$ ) entre les traitements. Les traitements T1 (1 mois après les premiers vols de la mineuse) et T2 (2 semaines après les premiers lâchers) ont enregistré le nombre de galeries le plus élevé avec respectivement  $12,38\pm 0,81$  et  $12,63\pm 0,84$  galeries/poquet. Le nombre de galeries a été plus faible ( $8,33\pm 0,75$  galeries/poquet) dans le traitement T3 (4 semaines après les premiers lâchers) en comparaison avec

le témoin T0 (Figure 45). La longueur moyenne des galeries a varié entre  $3,87\pm 0,18$  et  $4,35\pm 0,18$ cm sans différence significative entre les traitements (Figure 45).

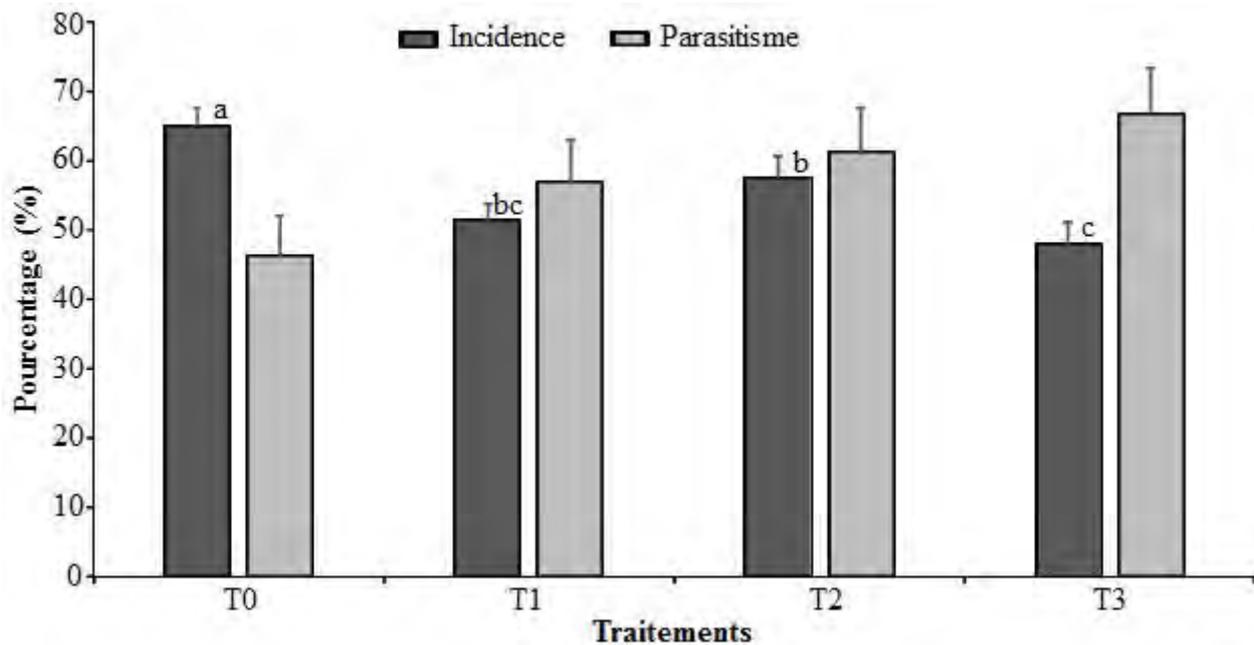


**Figure 45:** Nombre et longueur moyen ( $\pm$ écart-type) des galeries dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction des premières captures de la mineuse de l'épi du mil aux pièges lumineux.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ). T0= pas de lâcher effectuer; T1= lâcher un mois après la première capture de la mineuse au piège lumineux; T2= lâcher effectué 2 semaines après le premier lâcher; T3= lâcher 4 semaines après le premier lâcher.

#### 6.2.4. Incidence et parasitisme de la mineuse de l'épi dans le bloc de lâcher en fonction des stades de développement du mil

L'incidence de la mineuse a été élevée avec une différence significative entre les traitements (Figure 46). Le traitement T3 (stade de remplissage des grains de mil) a enregistré l'incidence la plus faible ( $F_{3,239} = 7,60$ ,  $P < 0,0001$ ) suivi du traitement T1 (stade de montaison du mil) avec respectivement  $48,18\pm 2,94\%$  et  $51,42\pm 2,52\%$  d'épis infestés en comparaison avec le témoin T0. Parallèlement le niveau de parasitisme des larves a été également plus élevé pendant le stade de remplissage des grains de mil (T3) avec  $66,67\pm 6,14\%$  de larves parasitées. Toutefois, la différence notée avec les autres traitements n'a pas été significative (Figure 46).

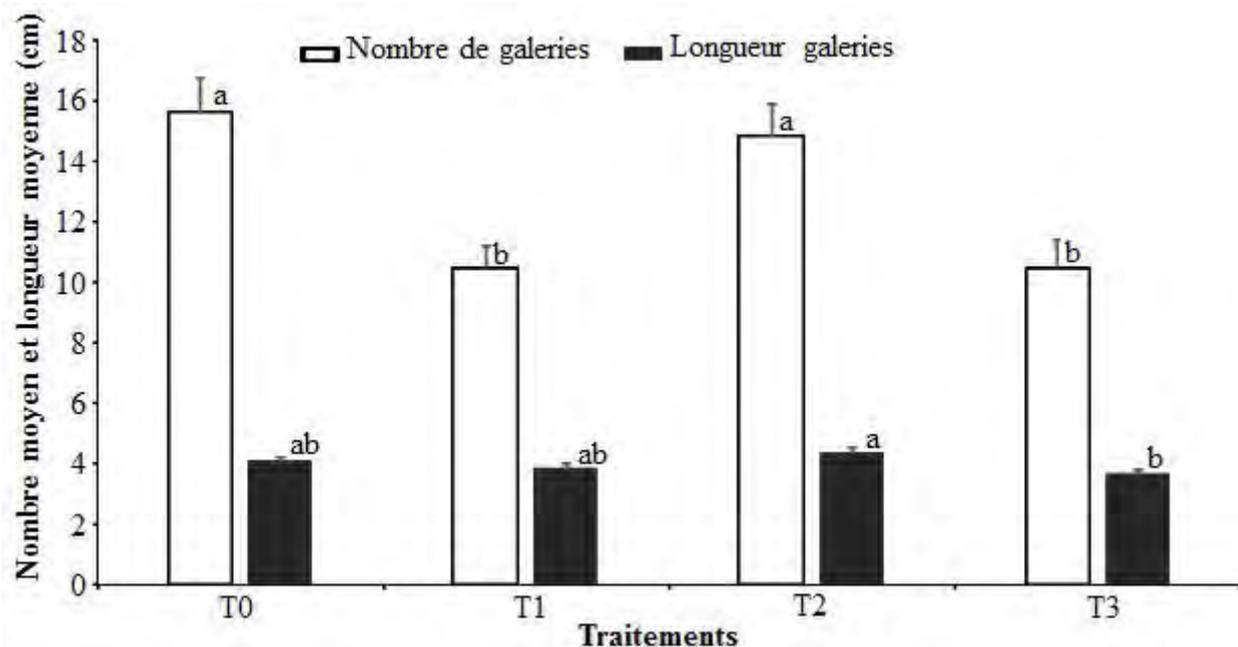


**Figure 46:** Incidence et niveau de parasitisme moyen ( $\pm$ écart-type) des larves de la mineuse de l'épi dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction du cycle de développement du mil.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettre ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ). T0= pas de lâcher; T1= lâcher au stade de montaison; T2= lâcher au stade de floraison; T3= lâcher au stade de remplissage.

### 6.2.5. Dégâts de la mineuse de l'épi dans le bloc de lâcher en fonction des stades de développement du mil

Le nombre de galeries a été significativement plus faible ( $F_{3,239} = 9,21$ ,  $P < 0,0001$ ) dans les traitements T3 et T1 avec respectivement  $10,48 \pm 0,93$  et  $10,50 \pm 0,69$  galeries/poquet en comparaison des traitements T0 et T2 (Figure 47). En ce qui concerne la longueur des galeries, elle a été plus faible ( $F_{3,239} = 3,36$ ,  $P < 0,0001$ ) dans le traitement T3 avec  $3,64 \pm 0,18$ cm. Les traitements T0 et T1 ont enregistré des longueurs moyennes de galeries variant entre  $3,82 \pm 0,19$ cm et  $4,08 \pm 0,12$ cm. La longueur des galeries a été plus élevée dans le traitement T2 ( $4,34 \pm 0,18$ cm) (Figure 47).



**Figure 47:** Nombre et longueur moyen ( $\pm$ écart-type) des galeries dans les différents traitements au niveau du bloc de lâcher en fonction du cycle de développement du mil.

**NB:** Les moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes ( $P=0,05$ ). T0= pas de lâcher effectuer; T1= lâcher au stade de montaison T2= lâcher au stade de floraison; T3= lâcher au stade de remplissage.

### 6.3. Discussion

Les premières captures de *H. albipunctella* enregistrées un mois après la première pluie utile corroborent les observations de nombreuses études sur la dynamique de population de cette espèce (Vercambre, 1978; Guèvremont, 1982; Ndoye, 1988; Ndoye et Gahukar, 1989; Nwanze et Sivakumar, 1990; Goudiaby, 2012). Les fluctuations des adultes de *H. albipunctella* observées entre les mois d'août et septembre concordent avec les résultats obtenus par Goudiaby (2012) mais s'opposent à d'autres études qui situent son activité de vol entre les mois de juillet et août (Guèvremont, 1982; Ndoye et Gahukar, 1989). La situation pluviométrique actuelle marquée par un décalage des pluies et des pauses pluviométriques pourrait expliquer ce phénomène observé sur la dynamique de vol de la mineuse de l'épi, étant donné que la pluviométrie est un facteur important dans la reprise d'activités des adultes (Bal, 1988b; Ndoye et Gahukar, 1989).

L'incidence élevée et variable de *H. albipunctella* entre 38% et 65% selon les différents traitements confirment la forte présence de la mineuse de l'épi dans l'agro-écosystème du mil, mais également la variabilité des attaques compte tenu de l'irrégularité de l'hivernage dans les zones cultivées (Lale et Sastawa, 2000; Goudiaby *et al.*, 2018).

Les lâchers de *B. hebetor* ont produit une mortalité significative par rapport au témoin un mois après les premières captures de la mineuse et deux semaines après les premiers lâchers, soit 30 et 45 jours après émergence (JAE) des adultes. Toutefois, l'augmentation du parasitisme a été plus

élevée à 45 JAE des papillons. Compte tenu de la biologie de *H. albipunctella*, la période de 45 JAE a coïncidé avec la présence des larves âgées, notamment les stades L2 et L3 qui sont favorables à la ponte et au développement des parasitoïdes, d'où le parasitisme élevé. Selon Akinkurolere *et al.* (2009) et Saxena *et al.* (2012), les larves hôtes âgées sont plus profitables pour *B. hebetor* d'autant plus que la population d'adultes de parasitoïdes émergents est beaucoup plus importante avec ces larves. Un mois après l'émergence des adultes de *H. albipunctella*, commencent à apparaître les larves de premier stade (L1) dans les parcelles de mil qui sont généralement moins préférées par *B. hebetor* (Akinkurolere *et al.*, 2009). Contrairement à la mortalité élevée des larves de *H. albipunctella* enregistrée après les lâchers 30 et 45 JAE des adultes, la réduction des dégâts n'a pas été significative par rapport aux parcelles témoins. Probablement, le parasitisme s'est produit après que le maximum de dégâts a été déjà occasionné dans les parcelles (Payne *et al.*, 2011). En outre, les variétés cultivées dans les différents traitements de même que la densité de populations du ravageur pourraient également expliquer ces résultats. Les faibles dégâts obtenus suivant les lâchers 60 jours après l'émergence des adultes de la mineuse malgré le faible niveau de parasitisme, seraient dus également à l'existence d'une faible population de la mineuse dans ces parcelles, d'où l'incidence faible enregistrée (Touré et Yéhouéno, 1995; Lale et Sastawa, 2000).

Le parasitisme élevé de *H. albipunctella* suivi de la réduction des dégâts après le lâcher au stade de remplissage des grains de mil pourrait s'expliquer par la présence des stades larvaires L2 et L3 à cette période (Saxena *et al.*, 2012). Par ailleurs, le parasitisme élevé et la réduction des dégâts observés au stade de montaison, malgré l'absence des larves de la mineuse de l'épi sur le mil, pourraient être dus aux parasitoïdes lâchés dans les parcelles qui se seraient maintenus sur d'autres hôtes. En effet, le stade végétatif du mil subit les attaques de plusieurs lépidoptères ravageurs telles que les espèces de Crambidae, Pyralidae, Noctuidae etc. qui sont généralement attaquées par *B. hebetor* (Milonas, 2005; Adarkwah *et al.*, 2010; Faal-Mohammad-Ali et Shishehbor, 2013; Ghimire et Phillips, 2014). Aussi, une population de *B. hebetor* provenant du milieu tels que les magasins de stockage de céréales et les habitations pourrait également expliquer ces observations, étant donné que les céréales stockés sont infestés par de nombreux lépidoptères qui servent d'hôtes alternatifs à *B. hebetor* (Heimpel *et al.*, 1997; Ghimire et Phillips, 2010a; Ghimire et Phillips, 2010b). Le potentiel de *B. hebetor* à causer une mortalité significative de plusieurs lépidoptères ravageurs des cultures et des produits stockés a été démontré dans de nombreuses études (Amir-Maafi et Chi, 2006; Adarkwah *et al.*, 2010; Saxena *et al.*, 2012; Ghimire et Phillips, 2014; Saadat *et al.*, 2014).

La mortalité significative des larves de la mineuse jusqu'à 70% notée dans toutes les parcelles où les lâchers ont été effectués est comparable au taux de parasitisme jusqu'à 97% obtenu après des lâchers de *B. hebetor* au Sénégal, Niger, Burkina Faso et Mali (Bhatnagar, 1989; Ba *et al.*, 2013; Ba *et al.*, 2014; Baoua *et al.*, 2014; Amadou, 2017; Kabore *et al.*, 2017). Une réduction des dégâts de *H. albipunctella* suivant des lâchers de *B. hebetor* aux champs a été également obtenue avec une augmentation du rendement de 34 - 50% (Baoua *et al.* 2014; Amadou *et al.* 2017). En outre, le niveau élevé de parasitisme obtenu après les lâchers 45 JAE des adultes de *H. albipunctella* et pendant le stade de remplissage des grains de mil corrobore les observations de Goudiaby (2012) qui situe les lâchers de *B. hebetor* entre 61 - 66 jours après la première pluie utile (JAPU) pour plus d'efficacité du parasitoïde. En général, cette période coïncide avec l'apparition des stades larvaires de la mineuse de l'épi, favorables à la ponte et au développement de *B. hebetor*. Une lutte biologique efficace de *H. albipunctella* avec l'utilisation du parasitoïde *B. Hebetor* dépendrait surtout du cycle de vie des deux espèces impliquées, mais également de la période de la saison à laquelle elles se rencontrent dans l'agro-écosystème du mil (Khatri *et al.*, 2017).

## **Conclusion**

Dans cette étude, les lâchers en fonction des premières apparitions des adultes de la mineuse de l'épi et des différents stades de développement du mil ont produit des résultats similaires. Une efficacité des bracons lâchés en milieu paysan a été notée. Cet efficacité s'est traduite par une augmentation du parasitisme des Bracons ainsi qu'une réduction des dégâts de la mineuse de l'épi plus importante obtenus au stade de remplissage des grains mais également à 45 jours après émergence des adultes de *H. albipunctella*. Ainsi, il ressort de cette étude que le stade de remplissage des grains de mil correspond à la période optimale de lâcher de *B. hebetor*. Cette période coïncide généralement avec la présence des larves de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> stade de *H. albipunctella* qui sont plus favorables au développement du parasitoïde environ 45 jours après émergence des adultes, soit 65 jours après la première pluie utile.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif global dans ce travail était de contribuer à la mise en place de stratégies de gestion intégrée des principaux insectes ravageurs du mil en particulier pour les foreurs de tiges et la mineuse de l'épi, *H. albipunctella*. Ce qui a nécessité la génération d'informations de base notamment sur la diversité des insectes dans l'agro-écosystème du mil, mais aussi l'état de la situation sur la régulation biologique des insectes ravageurs aussi bien par le mil que par les ennemis naturels.

En ce qui concerne la diversité des insectes en général dans l'agro-écosystème du mil du bassin arachidier, elle a été assez importante avec 92 espèces rencontrées. Ces espèces ont été réparties dans 32 familles et 7 ordres y compris les coléoptères, hyménoptères et lépidoptères qui ont été plus fréquemment rencontrés et plus abondants. De nouvelles espèces ont été rencontrées, toutefois une réduction ou érosion d'espèces a été également notée comparativement aux études antérieures. Les communautés d'insectes rencontrées incluent les ravageurs et ennemis naturels dont l'abondance dans l'agrosystème du mil serait due à la fois à une immigration dans les parcelles et à des émergences locales. Les principaux ravageurs rencontrés étaient les Meloidae, *M. pallipes*, *C. kulzeria*, *P.fusca*, *M. afzelli*, les phyllophages, *S. exempta*, *Xanthodes sp*, *C. chalcites*, *A. moloneyi*, *M. loreyi*, les Acrididae *K. angulifera* et *L. migratoria* ainsi que les mineuses de l'épi, *H. albipunctella* et *M. terracotoïdes* qui ont été plus fréquents sur le mil. Les espèces *C. ignefusalis*, *C. partellus*, *S. cretica*, *O. senegalensis* et *S. gregaria* ont été également rencontrées mais avec une faible population. Compte tenu de l'abondance des Meloidae du genre *Mylabris* et des lépidoptères phyllophages du genre *Spodoptera*, il serait intéressant de conduire des études spécifiques sur ces espèces afin de quantifier leur impact réel sur la production du mil en milieu paysan. Les ennemis naturels retrouvés ont été essentiellement des parasitoïdes et prédateurs généralistes fréquemment rencontrés dans l'agro-écosystème du mil. Par ailleurs, en dépit de l'abondance assez élevée des insectes dans l'agro-écosystème du mil, la densité des individus a été très variable et relativement faible. Aussi, il est ressorti de cette étude une co-évolution entre les populations d'insectes ravageurs et d'ennemis naturels en fonction de la phénologie du mil. En fait, la dynamique de population des lépidoptères ravageurs a été synchronisée avec celle des parasitoïdes et des prédateurs. Il en est de même entre les acrididae et les prédateurs cantharidae. Compte tenu de ces interactions et malgré l'abondance relativement élevée des insectes ravageurs, les ennemis naturels semblent exercer une régulation qui se traduit par le maintien d'un équilibre de ces deux communautés dans l'agro-écosystème. En outre, les fluctuations des insectes dans l'agro-écosystème semblent être liées à la répartition de la pluviométrie pendant la période d'étude.

Dans le cas particulier des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi, *H. albipunctella*, les résultats ont révélé que le niveau d'infestation de la mineuse de l'épi est plus importante dans l'agro-écosystème du mil du bassin arachidier comparativement à celui des foreurs de tiges. L'incidence, la densité des larves de foreurs de tiges mais aussi leur niveau de parasitisme naturel par les parasitoïdes ont été faibles en rapport avec l'abondance réduite des populations de ravageurs et de parasitoïdes liées probablement à la configuration de l'hivernage pendant la période d'étude, mais aussi à l'absence de zone refuge dans l'agrosystème, en particulier pour le maintien des populations de parasitoïdes. Les dégâts de foreurs de tiges sur le mil ont été dus aux espèces *C. ignefusalis*, *E. saccharina*, *B. fusca* et *S. calamistis* qui a été l'espèce prédominante. Il semble ressortir de cette étude une régression de *C. ignefusalis* qui est spécialisée sur le mil au profit de *S. calamistis* qui se serait adaptée sur cette céréale principalement cultivées dans le bassin arachidier. Cela incite à pousser d'avantage les études vers l'estimation des dégâts et pertes liées à cette espèce sur le mil en milieu paysan. En ce qui concerne le parasitisme des foreurs de tiges, les laves de *C. ignefusalis* ont été parasitées par *S. rufus*, *P. Soudanensis* et *S. parasitica* alors que la mortalité des larves de *S. calamistis* a été essentiellement due à *B. brevicornis* qui a été également plus abondante. Compte tenu de la prédominance de *B. brevicornis*, des expérimentations pour évaluer son efficacité et son potentiel en lutte biologique doivent être menées. L'incidence de la mineuse de l'épi a été relativement élevée au moment où la densité des larves et les pertes en grains estimées ont été faibles. La densité des larves et les pertes relativement faibles sont certainement en rapport avec des facteurs de mortalité tels que la prédation et le parasitisme des œufs qui réduisent le recrutement des larves mais également à la pluviométrie qui agit sur la levée de la diapause des adultes de *H. albipunctella* et qui est un facteur de mortalité des larves en plus de la prédation. Le parasitisme des larves de *H. albipunctella* a été relativement faible et dû essentiellement à *B. hebetor* qui est un parasitoïde très fréquent en milieu paysan lié à sa capacité de se maintenir sur de nombreux hôtes retrouvés dans le milieu. Globalement, au cours de cette étude, le parasitisme des larves de foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi a été causé quasi exclusivement par les parasitoïdes braconidae qui ont révélé en général un fort potentiel de régulation naturelle sur les ravageurs. En outre, il est apparu que le grattage pris comme labour par les producteurs, la rotation culturale en mil - légumineuse et le semis précoce ou tardif ont des effets variable sur l'incidence, la densité des larves de foreurs de tiges et de la mineuse de même que sur les pertes en grains estimées. Cette étude a également révélé dans le centre sud du bassin arachidier, une distribution spatiale agrégative pour les larves de foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi dans les parcelles de mil. L'analyse de la distribution spatiale a ainsi permis de fournir des

informations de base pour l'amélioration des programmes d'échantillonnages efficaces dans le cadre de la lutte contre ces principaux insectes ravageurs.

De plus, l'hypothèse d'une possibilité d'amplification de la régulation biologique des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi par l'utilisation des variétés résistantes et par le lâcher de parasitoïdes indigènes a été vérifiée. Dans le cadre de l'identification de variétés de mil résistantes, parmi les variétés évaluées, Gawane et Thialack2 aurait une source de résistance aux foreurs de tiges ayant conduit à une réduction des dégâts. En outre, la variété ISMI9507 posséderait une résistance à la mineuse de l'épi pour qui Thialack2 a également développé une tolérance aux attaques ayant permis de minimiser les pertes. Par rapport à la lutte biologique de la mineuse de l'épi, les lâchers augmentatifs du parasitoïde indigène *B. hebetor* ont permis d'augmenter significativement le niveau de parasitisme en milieu paysan, mais également de réduire les dégâts. Une période optimale de lâcher de *B. hebetor* à laquelle la mortalité des larves est significative a été identifiée au stade de remplissage des grains de mil. Cette période correspond à 45 jours après émergence des adultes de la mineuse coïncidant avec la présence des larves de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> stades favorables à la ponte et au développement du parasitoïde.

## PERSPECTIVES

À l'issue de cette thèse, il serait intéressant d'élargir l'étude de la diversité des insectes au nord du bassin arachidier et éventuellement évaluer la composition et la structure de l'agro-écosystème sur l'abondance et la diversité des insectes en général.

Il a été montré dans ce travail que les meloidae du genre *Mylabris* et les lépidoptères phyllophages du genre *Spodoptera* ont été très abondants et fréquents dans l'agrosystème du mil. Il serait important de conduire des études plus spécifiques pour déterminer leur impact sur les pertes de rendement du mil en milieu paysan.

*S. calamistis* a été le foreur de tiges le plus abondant et le plus fréquent pour devenir importante sur la culture du mil. Pour confirmer ces observations, des études sont nécessaires pour estimer les pertes liées aux dégâts de cette espèce. En outre il serait également intéressant d'évaluer les effets spécifiques des autres espèces de foreurs rencontrées pendant cette étude.

Le parasitoïde *B. brevicornis* semble être un important régulateur de la population de foreurs de tiges. Cette espèce pourrait être considérée dans les programmes de lutte biologique ou intégrée comme agent biologique potentiel pour réduire les dégâts de foreurs de tiges.

Etant donné que la résistance des nouvelles variétés Thialack2, Gawane et ISMI9507 a été évaluée en condition d'infestation naturelle d'où la variabilité de leur performance, il serait important de faire une évaluation en condition d'infestation artificielle pour une meilleure estimation de la performance de ces variétés. De même, il serait intéressant de déterminer les mécanismes de la résistance qui sont en jeu et éventuellement faire des études moléculaires pour identifier les gènes liés à la résistance dans ces variétés.

Concernant la lutte biologique de la mineuse de l'épi, il serait important de mettre en place un système de lâcher augmentatif du parasitoïde *B. hebetor* compte tenu de la distribution agrégative des larves dans les parcelles de mil pour une meilleure efficacité.

En outre, il serait également intéressant d'exploiter le parasitoïde *Trichogrammatidae armigera* qui a été observé parasitant jusqu'à 60% des œufs de la mineuse de l'épi au Sénégal afin de procéder à des lâchers au début des infestations sur le mil. En effet, faire des lâchers de *T. armigera* pendant la période de ponte de *H. albipunctella* en plus des lâchers de *B. hebetor* à la période optimale permettraient une lutte biologique efficace et efficiente contre la mineuse de l'épi.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abate, T., Van Huis, A., & Ampofo, J. K. O. (2000). Pest management strategies in traditional agriculture : an african perspective. *Annu. Rev. Entomol.*, 45, 631– 659.
- Acosta, L. G., Jahnke, S. M., Redaelli, L. R., & Pires, P. R. S. (2017). Insect diversity in organic rice fields under two management systems of levees vegetation. *Braz J Biol*, 77(4), 731-744.
- Adarkwah, C., Büttner, C., Reichmuth, C., Obeng-Ofori, D., Prozell, S., & Schöller, M. (2010). Ability of the larval ectoparasitoid *Habrobracon hebetor* (Say, 1836) (Hymenoptera: Braconidae) to locate the rice moth *Corcyra cephalonica* (Stainton, 1865) (Lepidoptera: Pyralidae) in bagged and bulk stored rice. *J. Plant Dis. Protect.*, 117(2), 67–70.
- Ajayi, O. (1989). Sorghum stem borers in West Africa. In K. F. Nwanze, S. Kearl, & V. Sadhana (Eds.), *International Workshop on sorghum stem borers; 17-20 Nov 1987*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 27-31.
- Ajayi, O. (1990). Possibilities for integrated control of the millet stem borer, *Acigona ignefusalis* Hampson (Lepidoptera:Pyralidae) in Nigeria. *Insect Sci Applic.*, 11(2), 109-117.
- Ajayi, O. (2000). Le sorgho en Afrique occidentale. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 41-47.
- Akinkulore, R. O., Boyer, S., Chen, H., & Zhang, H. (2009). Parasitism and host-location preference in *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae): role of refuge, choice, and host instar. *J. Econ. Entomol.*, 102(2), 610-615.
- Aladelele, S. E., & Mustapba, O. T. (2003). Screening pearl millet for resistance to *Striga hermonthica* in the Sahel ecology of Northern Nigeria. *Nigerian J Genet.*, 18, 85-89.
- Altieri, M. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 19-31.
- Amadou, I., Gounga, M. E., & Le, G. W. (2013). Millets: Nutritional composition, some health benefits and processing - A Review. *Emir. J. Food Agric.*, 25(7), 501-508.
- Amadou, L., Baoua, I. B., Ba, M. N., Hausmann, B., & Altiné, M. (2017). Gestion de la chenille mineuse de l'épi du mil par des lâchers du parasitoïde *Habrobracon hebetor* Say au Niger. *Cahiers Agricultures*, 26(5), 55003.
- Amaral, M. K., Péllico Netto, S., Lingnau, C., & Figueiredo Filho, A. (2015). Evaluation of the morisita index for determination of the spatial distribution of species in a fragment of Araucaria forest. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 13(2), 361-372.
- Amir-Maafi, M., & Chi, H. (2006). Demography of *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae) on two pyralid hosts (Lepidoptera: Pyralidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 99(1), 84-90.
- Anonyme. (1991). Mémento de l'agronome (4<sup>ème</sup> ed.). Ministère français de la coopération et du développement: Paris, France. p.1635.
- Anonyme. (2011). Pearl Millet: production guidelines. Department of Agriculture, Forestry and Fisheries: Pretoria, South Africa. p.20.
- Ansari, M. A., Casteels, H., Tirry, L. et Moens, M. (2006). Biology of *Hoplia philanthus* (Col., Scarabaeidae, Melolonthinae): a new and severe pest in belgian turf. *Environ. Entomol.*, 35(6), 1500–1507.
- ANSD. (2016). Bulletin mensuel des statistiques économiques. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie:Dakar, Sénégal. p.108.
- Arun, K., & Manga, V. K. (2011). Downy Mildew of Pearl Millet. *Bioresearch Bulletin*, 4, 182-200.

- Assefa, Y., Conlong, D., & Mitchell, A. (2006). First records of the stem borer complex (Lepidoptera: Noctuidae; Crambidae; Pyralidae) in commercial Sugarcane Estates of Ethiopia, their host plants and natural enemies. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.*, 80, 202-213.
- Assefa, Y., Conlong, D. E., Van Den Berg, J., & Mitchell, A. (2010). Distribution of sugarcane stem borers and their natural enemies in small scale farmer's fields adjacent margins and wetlands of Ethiopia. *Int. J. Pest Manage*, 56(3), 233-241.
- Ba, M. N., Baoua, I. B., Amadou, L., Dabire-Binso, C., Kabore, A., Oumarou, N., & Sanon, A. (2014). Augmentative on-farm delivery methods for the parasitoid *Habrobracon hebetor* Say (Hymenoptera: Braconidae) to control the millet headminer *Heliocheilus albipunctella* (de Joannis) (Lepidoptera: Noctuidae) in Burkina Faso and Niger. *BioControl*, 59, 689-696.
- Ba, M. N., Baoua, I. B., M., N. D., Dabire-Binso, C., Sanon, A., & Tamò, M. (2013). Biological control of the millet headminer *Heliocheilus albipunctella* in the Sahelian region by augmentative releases of the parasitoid wasp *Habrobracon hebetor*: effectiveness and farmers' perceptions. *Phytoparasitica*, 41, 569-576.
- Bakr, R. F. A., Gesraha, M. A., Guneidy, N. A. M., Farag, N. A. E., Ebeid, A. R., Elbehery, H. H. A., & Abou-Ellail, M. (2014). Biological studies on *Bracon brevicornis* (Hymenoptera: Braconidae) reared on different host larvae *Egypt. Acad. J. Biolog. Sci.*, 7(2), 89 – 95.
- Bal A. B. (1988a). *Acigona ignefusalis* hmps et *Raghuva albipunctella* de Joannis, ravageurs du mil au Sénégal: dynamique des populations imaginales et infestations au champ. ISRA: Bambey, Sénégal. p. 21.
- Bal A. B. (1988b). Nombre de stades larvaires d'*Eldana saccharina* Walker et facteurs de variation. *Sénégalaise des Recherches Agricoles et Halieutiques*, 1(1), 2-16.
- Bal, A. B. (1993). Etude du parasitisme naturel d'*Heliocheilus albipunctella* de Joanis (Lépidoptère: Noctuidae) par *Trichogrammatoidea* sp (Hyménoptère: Trichogrammatoidea) à Bambey *Insect Sci. Applic.*, 14(2), 221-223.
- Bal, A. B., Ouambama, Z., Moumouni, A., Dieng, I., Maïga, I. H., Gagare, S., & Axelsen, J. A. (2015). A simple tentative model of the losses caused by the Senegalese grasshopper, *Oedaleus senegalensis* (Krauss 1877) to millet in the Sahel. *Int. J. Pest Manage*, 61(3), 198-203.
- Baldé, M. (1993). Synthèse des acquis de la recherche entomologique sur les cultures céréalières et légumineuses. ISRA-CNRA: Bambey, Sénégal. p.23.
- Balzan, M. V., Bocci, G., & Moonen, A.-C. (2015). Landscape complexity and field margin vegetation diversity enhance natural enemies and reduce herbivory by Lepidoptera pests on tomato crop. *BioControl*, 61(2), 141-154.
- Baoua, I. B., Amadou, L., Oumarou, N., Payne, W., Roberts, J. D., Stefanova, K., & Nansen, C. (2014). Estimating effect of augmentative biological control on grain yields from individual pearl millet heads. *J. Appl. Entomol.* 138(4), 281-288.
- Bekoye, B. M., & Dadie, A. (2015). Evaluation des pertes en grains de mil dues aux insectes. *Eur. Sci. J.*, 11(21), 266-275.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol. Lett.*, 1-13.
- Bhatnagar, V. S. (1987). Conservation and encouragement of natural enemies of insect pests in dryland subsistence farming: Problems, progress and prospects in the Sahelian zone. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 8(4-5-6), 791-795
- Bhatnagar, V. S. (1989). Lutte biologique contre la chenille mineuse de l'épi de mil. *Sahel PV Info*, 12, 5-9.

- Bhawane, G. P., Gaikwad, S. M., Mamlayya, A. B. et Aland, S. R. (2011). Life cycle of *Holotrichia karschi* Brenske (Coleoptera: Scarabaeidae: Melolonthinae). *The Bioscan*, 6(3), 471-474.
- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H., & Tschardt, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural Sustainable pest regulation in agricultural landscapes and pest control. *Proc. R. Soc. B*, 273, 1715–1727.
- Bignebat, C., & Sakho-Jimbira, M. S. (2013). Migrations et diversification des activités économiques locales : étude du bassin arachidier du Sénégal. *Mondes en développement*, 164, 93-114.
- Bonato, O., Noronha, A. C. D. S., & De Moraes, G. (1999). Distribution et échantillonnage des populations *Amblyseius manihoti* Moraes (Acari, Phytoseiidae) sur manioc au Brésil. *J. Appl. Entomol.*, 123, 430-435.
- Bonhof, M. J., Overholt, W. A., Van-Huis, A., & Polaszek, A. (1997). Natural enemies of cereal stemborers in Eastern Africa: a review. *Insect Sci. Applic.*, 17(1), 19-35.
- Bosquez-Perez, N. A., & Schulthess, F. (2000). Le maïs en Afrique de l'Ouest. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs de tiges de céréale en Afrique: importance économique, Systématique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 11-24.
- Bosquez-Perez, N. A., Ubeku, J. A., & Polaszek, A. (1994). Survey for parasites of *Sesamia calamistis* (Lep. : Noctuidae) et *Eldana saccharina* (Lep. : Pyralidae) in Southwestern Nigeria. *Entomophaga*, 39(3/4), 367-376.
- Botha, M., Siebert, S. J., Van Den Berg, J., Maliba, B. G., & Ellis, S. M. (2015). Plant and arthropod diversity patterns of maize agro-ecosystems in two grassy biomes of South Africa. *Biodivers. Conserv.*, 24(7), 1797-1824.
- Burgarella, C., P. Cubry, N. A. Kane, R. K. Varshney, C. Mariac, X. Liu, C. Shi, M. Thudi, M. Couderc, X. Xu, A. Chitiki, N. Scarcelli, A. Barnaud, B. Rhoné, C. Dupuy, O. François, C. Berthouly-Salazar and Y. Vigouroux (2018). A western Sahara centre of domestication inferred from pearl millet genomes. *Nat. Ecol. Evol.* 2: 1377–1380.
- CABI. (2006). Crop protection compendium. Wallingford, UK: CABI.
- Calvet, R., Barriuso, E., Bedos, C., Benoit, P., Charnay, M. P., & Coquet, Y. (2005). *Les pesticides dans le sol : Conséquences agronomiques et environnementales* (France Agricole ed.): 637.
- Chaplin-Kramer, R., & Kremen, C. (2012). Pest control experiments show benefits of complexity at landscape and local scales *Ecol. Appl.*, 22(7), 1936–1948.
- Chaplin-Kramer, R., Rourke, M. E. O., Blitzer, E. J., & Kremen, C. (2011). A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, 14, 922–932.
- Chinwada, P. (2002). Stemborer parasitism by *Cotesia sesamiae* and *Sturmiopsis parasitica* and an assessment of the need to introduce *Cotesia flavipes* into Zimbabwe. *PhD thesis*. Kenyatta University: Kenya. p.179.
- Colvin, J. et Holt, J. (1996). Modèle d'étude des effets de la pluviométrie, de la prédation et de la quiescence des œufs sur la dynamique des populations du Criquet sénégalais *Oedalus senegalensis*. *Sécheresse*, 7, 145-150.
- Coop, L. B., & Croft, B. A. (1992). Damage rates to pearl millet by adults of five grasshopper species and *Psalydolytta* blister beetles in Mali. *Int. J. Pest Manage*, 38(2), 201-205.
- CSE. (2007). Caractérisation des systèmes de production agricole au Sénégal. *Document de synthèse*. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable: Dakar, Sénégal. p.38.
- CSE. (2015). Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable: Dakar, Sénégal. p.2011.

- Cuevas-Reyes, P., Quesada, M., Hanson, P., & Oyama, K. (2007). Interactions among three trophic levels and diversity of parasitoids: a case of top-down processes in Mexican tropical dry forest. *Environ. Entomol.*, 36(4), 792-800.
- Das, I. K. (2017). Millet diseases: current status and their management. In J. V. Patil (Ed.), *Millets and Sorghum: Biology and Genetic Improvement* (1st ed.). John Wiley & Sons Ltd: New York, USA. 291-322.
- Dione, M., Diop, O., Dièye, P. N., & Ndao, B. (2008). Caractérisation et Typologie des exploitations agricoles familiales du Sénégal: bassin arachidier. *Etudes et documents* (Tome 3). 8: 30.
- Drame-Yaye, A., Youm, O., & Ayertey, J. N. (2003). Assessment of grain yield losses in pearl millet due to the millet stem borer, *Coniesta ignefusalis* (HAMPSON). *Insect Sci. Applic.*, 23(3), 259-265.
- Duelli, P., Obrist, M. K., & Schmatz, D. R. (1999). Biodiversity evaluation in agricultural landscapes: above-ground insects. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 74, 33-64.
- Dykes, L., & Rooney, L. W. (2007). Phenolic Compounds in Cereal Grains and Their Health Benefit. *Cereal foods world*, 52(3), 105-111.
- Faal-Mohammad-Ali, H., & Shishehbor, P. (2013). Biological parameters of *Bracon hebetor* (Hym.: Braconidae) parasitizing *Ephestia kuehniella* (Lep.: Pyralidae): effect of host diet. *J. Crop Prot.*, 2(4), 411-419.
- Fall, A. A., & Lo, M. (2009). Etude de référence sur les céréales : mil, sorgho, maïs et fonio au Sénégal. CORAF. p. 138.
- FAO. (1995). Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. *Collection FAO: alimentation et nutrition* (Vol. 27). Rome, Italie. p. 198.
- FAOSTAT. (2017). Base de données en ligne, FAO. [consulté le 13 Feb 2017]. <http://www.faostat.org>.
- Fernandes, P. (1999). Effets des modes de gestion des terres en zone sahélienne sur les terres et l'évolution de leur bilan organique et biologique : conséquence pour une production céréalière soutenue - cas du Sénégal. *Thèse de doctorat*. Institut National Polytechnique de Lorraine: Lorraine, France. p. 108.
- Gahukar, R. T. (1981). Biological control of insect pests of sorghum and pearl millet in West Africa. In *Biological control of pests : Its potentiel in west africa; Proceeding of an international conference; Feb 9-13*. USAID Regional Food Crop Protection project: Dakar, Sénégal. 69-91.
- Gahukar, R. T. (1984). Insect pests of pearl millet in West Africa: A review. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 30(2), 142-147.
- Gahukar, R. T. (1987). Relationship between spike worm (*Raghuva albipunctella*) infestation and flowering of pearl millet, and some sources of resistance. *Agronomie*, 7(8), 595-598.
- Gahukar, R. T. (1990a). Sampling techniques, spatial distribution and cultural control of millet spike worm, *Raghuva albipunctella* (Noctuidae: Lepidoptera). *Ann. appl. Biol.*, 117, 45-50.
- Gahukar, R. T. (1990b). Preliminary comparison of spike development stages for insecticide application against *Heliocheilus albipunctella* de Joanis in pearl millet. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 11, 205-208.
- Gahukar, R. T. (1991). Pest status and control of blister beetles in West Africa. *Int. J. Pest Manage*, 37(4), 415-420.
- Gahukar, R. T. (1994). Storage of food grains and insect control in developing countries. *Insect Sci. Applic.* 15, 3583-400.
- Gahukar, R. T., & Ba, M. N. (2019). An Updated Review of Research on *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae), in Sahelian West Africa. *Journal of Integrated Pest Management*, 10(1).

- Gahukar, R. T., Guèvremont, H., Bhatnagar, V. S., Doumbia, Y. O., Ndoye, M., & Pierrard, G. (1986a). A review of the pest status of the millet spike worm, *Raghuva albipunctella* De Joanis (Noctuidae: Lepidoptera) and its management in the Sahel. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 7(4), 457-463.
- Gahukar, R. T., Bos, W. S., Bhatnagar, V. S., Dieme, F., Bal, A. B., & Fytizas, F. (1986b). Acquis récents en entomologie du mil au Sénégal. *Document présenté à la réunion d'évaluation du programme mil 19-21 Mars 1986*. ISRA: Dakar, Sénégal. pp. 29.
- Gardner, J., Hoffmann, M. P., Cheever, S. A., Seaman, A. J., Westgate, P., & Hazzard, R. V. (2007). Large-scale releases of *Trichogramma ostrinae* to suppress *Ostrinia nubilalis* in commercially grown processing and fresh market sweet corn. *J. Appl. Entomol.*, 131(6), 432-440.
- Gebre-Amlak, A., Sigvald, R., & Pettersson, J. (1989). The relationship between sowing date, infestation and damage by the maize stalk borer, *Busseola fusca* (Noctuidae), on maize in Awassa, Ethiopia. *Int. J. Pest Manage.*, 35(2), 143-145.
- Ghimire, M. N., & Phillips, T. W. (2010a). Suitability of different lepidopteran host species for development of *Bracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae). *Environ. Entomol.*, 39(2), 449-458.
- Ghimire, M. N., & Phillips, T. W. (2010b). Mass rearing of *Habrobracon hebetor* Say (Hymenoptera: Braconidae) on larvae of the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae): effects of host density, parasitoid density, and rearing containers. *J. Stored Prod. Res.*, 46(4), 214-220.
- Ghimire, M. N., & Phillips, T. W. (2014). Oviposition and reproductive performance of *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae) on six different pyralid host species. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 107(4), 809-817.
- Goudiaby, M. F. (2012). Suivi du voltinisme et des différents stades de développement de *Heliocheilus albipunctella* de joannis (Lepidoptera: Noctuidae), la chenille mineuse de l'épi du mil pour le lâcher du parasitoïde *Bracon hebetor* Say (Hymenoptera: Braconidae) dans la communauté rurale de Dya. *Mémoire de Master*. Université Cheikh Anta Diop de Dakar: Dakar, Sénégal. p.33.
- Goudiaby, M. F., Sarr, I., & Sembene, M. (2018). Source of resistance in pearl millet varieties against stem borers and the ear headminer. *J. Entomol. Zool. Stud.*, 6(1), 1702-1708.
- Gounou, S., Jiang, N., & Schulthess, F. (2009). Long-term seasonal fluctuations of lepidopteran cereal stemborers and their natural enemies on maize and wild host plants in southern Benin. *Insect Sci.*, 16, 329-341.
- Gray, M. E., Ratcliffe, S. T., & Rice, M. E. (2009). The IPM paradigm: concepts, strategies and tactics. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integrated pest management : Concepts, tactics, strategies and case studies*. Cambridge University Press: New York, USA. 1-13.
- Greathead, D. J., Kooyman, C., Launois-Luong, M. H. et Popov, G. B. (1994). Les ennemis naturels des criquets du Sahel. *Collection Acridologie Opérationnelle*, 8, p. 86.
- Grunshaw, J. P., Mariko, S., & Troare, I. (1994). Field studies on the biology and economic importance of *Psalydolytta* spp. (Coleoptera: Meloidae: Meloinae) in Mali, West Africa. *Bull. Entomol. Res.*, 84(4), 493-502.
- Guèvremont, H. (1982). Etudes sur la mineuse de l'épi du mil et autres insectes du mil. *Rapport annuel de recherches pour l'année 1981*. CNRA de Tarna: Maradi, Niger. p. 57.
- Guèye, M. T., Cissokho P. S., Goergen G., Ndiaye S., Seck D., Guèye G., Wathelet J. P. and Lognay G. (2012). Efficacy of powdered maize cobs against the maize weevil *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) in stored maize in Senegal. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 32(2), 94-100.
- Gupta, S. C. (1986). The pearl millet improvement program in Senegal (pp. 83). Bambeby, BP 53, Sénégal: ISRA.

- Gurr, G. M., Wratten, S. D., Landis, D. A., & You, M. (2017). Habitat Management to Suppress Pest Populations: Progress and Prospects. *Annu Rev Entomol*, 62, 91-109.
- Gworgwor, N. A. (2007). Trees to control weeds in pearl millet. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(2), 89-94.
- Harris, K. M. (1989). Bioecology of sorghum stem borers. In K. F. Nwanze, S. Kearl, & V. Sadhana (Eds.), *International Workshop on sorghum stem borers; 17-20 Nov 1987*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 63-71.
- Harris, K. M. (1995). Word review of recent research on panicle insect pests of sorghum and pearl millet In K. F. Nwanze & O. Youm (Eds.), *Panicle insect pests of sorghum and pearl millet; Proceedings of an International Consultative Workshop. 4-7 Oct 1993*. ICRISAT Sahelian Center: Niamey, Niger. 7-25.
- Harris, K. M. (2000). Ordre Diptera. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 267-284.
- Harris, K. M., & Youm, O. (2000). Le mil en Afrique occidentale. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemie naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 49-50.
- Heimpel, G. E., Antolin, M. F., Franqui, R. A., et Strand, M. R. (1997). Reproductive isolation and genetic variation between two "stain" of Bracon hebetor (Hymenoptera: Braconidae). *Biol. Control*, 9, 149-156
- Holloway, J. D. (2000). Famille Noctuidae. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et methodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 81-89.
- Hordzi, W. H. K., & Botchey, M. A. (2012). Some parasitoids of lepidopterous stem borer pests on maize in Southern Ghana. *Bull. Environ. Pharmacol. Life Sci.*, 1(6), 77-83.
- Horn, D. J. (2009). IPM as applied ecology: the biological precepts. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integreted pest management : Concepts, tactics, strategies and case studies*. Cambridge University Press: New York, USA. 51-61.
- ISRA. (1979). Rapport annuel 1976 de la recherche agronomique. Bambey, Sénégal. p.274.
- Jago, N. D. (1993). Méthodes d'évaluation des pertes de récolte dans le mil *NRI Bulletin*. Institut des Ressources Naturelles: Chatham, RU. Vol. 62. pp. 81.
- Jeeterwal, R. C., Sharma, L. D., Nehra, A., & Mundiyyara, R. (2018). Genetic parameters of grain yield and its contributing characters in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) under varying environmental conditions. *Int. J. Pure App. Biosci*, 6(1), 992-996.
- Jepson, P. C. (2009). Assessing environmental risks of pesticides. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integreted pest management : Concepts, tactics, strategies and case studies*. Cambridge University Press: New York, USA. 203-219.
- Jukanti, A. K., Gowda, C. L. L., Rai, K. N., Manga, V. K., & Bhatt, R. K. (2016). Crops that feed the world 11. Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* L.): an important source of food security, nutrition and health in the arid and semi-arid tropics. *Food Security*, 8(2), 307-329.
- Kabore, A., Ba, N. M., Dabire-Binso, C. L., & Sanon, A. (2017). Field persistence of *Habrobracon hebetor* (Say) (Hymenoptera: Braconidae) following augmentative releases against the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (de Joannis) (Lepidoptera: Noctuidae), in the Sahel. *Biol. Control*, 108, 64–69.
- Kalaisekar, A., & Padmaja, P. G. (2017). Insect pests of millets and their host plant relations. In J. V. Patil (Ed.), *Millets and Sorghum: Biology and Genetic Improvement* (1st ed.) John Wiley & Sons, Ltd: New York, USA. 267-290.
- Karimoune, L., Ba, M. N., Baoua, I. B., et Muniappan, R. (2018). The parasitoid *Trichogrammatoidea armigera* Nagaraja (Hymenoptera: Trichogrammatidae) is a potential candidate for biological control of the millet head miner *Heliocheilus albipunctella* (de Joannis) (Lepidoptera: Noctuidae) in the Sahel. *Biol. Control*, 127, 9-16.

- Kfir, R. (2000). Le maïs et le sorgho en Afrique australe. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 31-40
- Kfir, R., Overholt, W. A., Khan, Z. R., & Polaszek, A. (2002). Biology and management of economically important lepidopteran cereal stem borers in africa. *Annu. Rev. Entomol.*, 47, 701-731.
- Khan, Z. R. (1997). A Review of entomological techniques and methods used to determine mechanisms and bases of stem borer resistance in maize. In J. A. Mihm (Ed.), *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization; Proceedings of an International Symposium; 27 November-3 December, 1994*. CIMMYT: Mexico, D.F. 62-69.
- Khatri, D., He, X. Z., & Wang, Q. (2017). Effective biological control depends on life history strategies of both parasitoid and its host: evidence from *Aphidius colemani*-*Myzus persicae* System. *J Econ Entomol*, 110(2), 400-406.
- Khouma, M., Jalloh, A., Thomas, T. S., & Nelson, G. C. (2017). Sénégal. In A. Jalloh, G. C. Nelson, T. S. Thomas, R. Zougmore, & H. Roy-Macauley (Eds.), *L'agriculture Ouest-Africain et le changement climatique*. International Food Policy Research Institute: Washington DC, USA. 303-334.
- Krebs, C. J. (1999). *Ecological methodology* (2nd. ed.). Benjamin/Cumming: New York. p. 620.
- Kumar, H. (1997). Overview of research on mechanisms of resistance in maize to spotted stem borer. In J. A. Mihm (Ed.), *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization; Proceedings of an International Symposium; 27 November-3 December, 1994*. CIMMYT: Mexico, D.F. p.70-81.
- Kumar, R. (1991). *La lutte contre les insectes ravageurs*. Karthala CTA ed. CTA: Wageningen, Pays-Bas. p.310.
- Lale, N. E. S., & Sastawa, B. M. (2000). Evaluation of host plant resistance, sowing date modification and intercropping as methods for the control of *Mylabris* and *Coryna* species (Coleoptera: Meloidae) infesting pearl millet in the Nigerian Sudan savanna. *J Arid Environ.*, 46, 263–280.
- Launois, M. (1989). *Oedaleus senegalensis* (krauss, 1877) sauteriaux ravageurs du Sahel *Collection Acridologie Opérationnelle*. Ministère des Affaires Étrangères des Pays-Bas et CIRAD/PRIFAS: France. 4, p. 36.
- Lawani, S. M. (1982). A review of the effects of various agronomic practices on cereal stem borer populations. *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 28(3), 266-276.
- Leslie, G. (2008). Estimating the economic injury level and the economic threshold for the use of fastac® against *Eldana saccharina* (Lepidoptera: Pyralidae). *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.*, 81, 319-323.
- Leslie, G. W. (2009). Estimating the economic injury level and the economic threshold for the use of  $\alpha$ -cypermethrin against the sugarcane borer, *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Int. J. Pest Manage*, 55(1), 37-44.
- Liere, H., Kim, T. N., P. Werling, B., D. Meehan, T., Landis, D. A., & Gratton, C. (2015). Trophic cascades in agricultural landscapes: indirect effects of landscape composition on crop yield. *Ecological Applications*, 25(3), 652–661.
- Lik, M. (2010). The influence of habitat type on the population dynamics of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in marshland. *Ann. soc. entomol. Fr. (n.s.)*, 46(3-4), 425-438.
- MAER. (2012). *Catalogue officiel des espèces et variétés cultivées au Sénégal* (1ère ed.). Sénégal. p.192.
- Maes, K. V. N. (2000). Superfamille Pyraloidea: Crambidae, Pyralidae. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 91-103.
- Maiga, S. D. (1984). *Rapport annuel 1983. Projet CILSS de lutte intégrée contre les ennemis des cultures vivrières dans le Sahel*. Niger, Niamey. p.42.

- Maiga, I. H., Lecoq, M., & Kooyman, C. (2008). Ecology and management of the Senegalese grasshopper *Oedaleus senegalensis* (Krauss 1877) (Orthoptera: Acrididae) in West Africa: review and prospects. *Ann. soc. entomol. Fr. (n.s.)*, 44(3), 271-288.
- Mailafiya, D. M., LeRu, B. P., Kairu, E. W., Calatayud, P. A., & S.Dupas. (2009). Species diversity of lepidopteran stem borer parasitoids in cultivated and natural habitats in Kenya. *J. Appl. Entomol.*, 133, 416–429.
- Maiti, R. K., & Bidinger, F. R. (1981). Growth and the development of the pearl millet plant. *Research. Bulletin*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 6, p.17.
- Martina, E. A., Reineking, B., Seo, B., & Steffan-Dewenter, I. (2013). Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes. *PNAS*, 110(14), 5534–5539.
- Matama-Kauma, T., Schulthess, F., Mueke, J. M., Omwega, C. O., & Ogwang, J. A. (2006). Effect of wild grasses planted as border rows on stemborer infestations in maize in Uganda. *Ann. soc. entomol. Fr. (n.s.)*, 42(3-4), 455-460.
- Mbaye, D. F. (1993). Contraintes phytosanitaires du mil dans le Sahel: état des connaissances et perspectives. In H. Serge (Ed.), *Le mil en Afrique: diversité génétique et agro-physiologique : potentialités et contraintes pour l'amélioration et la culture*. ORSTOM: Paris, France. 173-186.
- McCabe, E., Loeb, G., & Grab, H. (2017). Responses of crop pests and natural enemies to wildflower borders depends on functional group. *Insects*, 8(3).
- McDonald, J. H. (2009). Handbook of biological statistics (2nd ed.). Sparky House Publishing: Baltimore, Maryland, U.S.A. 319.
- McHugh J. V. et Liebherr J. K. (2009). Coleoptera: (Beetles, Weevils, Fireflies). In V.H. Resh et R.T. Cardé (Eds.), *Encyclopedia of Insects*, (2nd ed.). Academic Press: San Diego. 183–201.
- Melo, M. M., Silva, C. M., Barbosa, C. S., Morais, M. C., D'Anuniação, P. E. R., da Silva, V. X., & Hasui, É. (2016). Fragment edge and isolation affect the food web: effects on the strength of interactions among trophic guilds. *Biota Neotropica*, 16(2).
- Mengistu, L., Tefera, T., Assefa, Y., & Yirefu, F. (2009). Biology of *Sesamia calamistis* Hampson (Lepidoptera : Noctuidae) at Metahara. *Proc. Ethiop. Sugar. Ind. Bienn. Conf.*, 1, 3
- Michels Jr, G. J., Carney, V. A., Jones, E. N., & Pollock, D. A. (2010). Species diversity and qualitative assessment of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in three riparian habitats. *Environ. Entomol.*, 39(3), 738-752.
- Milonas, P. G. (2005). Influence of initial egg density and host size on the development of the gregarious parasitoid *Bracon hebetor* on three different host species. *BioControl*, 50, 415–428.
- Moolman, H. J., VanDen Berg, J., Conlong, D., Cugala, D., Siebert, S. J., & Le Ru, B. P. (2013). Diversity of stem borer parasitoids and their associated wild host plants in South Africa and Mozambique *Phytoparasitica*, 41, 89–104.
- Moon, R. D., & Wilson, L. T. (2009). Sampling for detection, estimation and IPM decision making. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integrated pest management : Concepts, tactics, strategies and case studies*. Cambridge University Press: New York, USA. 75-89.
- Mooney, H., Larigauderie A., Cesario M., Elmquist T., Hoegh-Guldberg O., Lavorel S., Mace G. M., Palmer M., Scholes R. and Yahara T. (2009). Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 46-54.
- Mutamiswa, R., Moeng, E., Le Ru, B. P., Conlong, D. E., Assefa, Y., Gofitshu, M., & Nyamukondiwa, C. (2017). Diversity and abundance of lepidopteran stem borer natural enemies in natural and cultivated habitats in Botswana. *Biol. Control*, 115, 1-11.

- Nambiar, V. S., Dhaduk, J. J., Sareen, N., Shahu, T., & Desai, R. (2011). Potential functional implications of Pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in health and disease. *J. Appl. Pharm. Sci*, 1(10), 62-67.
- Ndoye, M. (1979). L'entomofaune nuisible du mil à chandelle (*Pennisetum typhoides*) au Sénégal. *Proceedings du congrès sur la lutte contre les insectes en milieu tropical*. Marseille, France. 515-530.
- Ndoye, M. (1980). *Goniozus proceræ* Risbec (Hymenoptere, Bethyilidae) ectoparasite larvaire d'*Acigona ignefusalis* (Lepidoptera, Pyralidae, Crambinae). ISRA-CNRA: Bambey, Sénégal. p.10.
- Ndoye, M. (1988). Biologie et écologie de deux lépidoptères: *Amsacta moloneyi* Druce (Lépidoptera, Arctiidea) et *Heliocheilus albipunctella* (De Joannis) (Lépidoptère, Noctuidae) deux ravageurs du mil au Sénégal. *Thèse de Doctorat*. Université Paul-Sabatie: Toulouse, France.p.227.
- Ndoye, M. (1991). Biologie et dynamique des populations de *Heliocheilus albipunctella* (De Joannis) ravageur de la chandelle de mil dans le Sahel. *Sahel PV Info*, 39, 11-20.
- Ndoye, M., & Gahukar, R. T. (1987). Insect pest of pearl millet in West Africa and their control. In J. R. Witcombe & S. R. Beckerman (Eds.), *Proceedings of the International Pearl Millet Workshop, 7-11 April 1986*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 195-205.
- Ndoye, M., & Gahukar, R. T. (1989). Les insectes ravageurs du mil à chandelle dans le Sahel. *Afr. J. Plant Prot.*, 4(2), 1 – 43.
- Ndoye, M., Gahukar, R. T., Carson, A. G., Selvarej, C. J., Mbaye, D. F., & Diallo, S. (1986). Les problèmes phytosanitaires du mil dans le Sahel *Compte-rendu du séminaire international du projet CILSS de lutte Intégré; 6-13 Dec. 1984*. CILSS: Ouagadougou, Burkina. 79-94.
- Ngamb, M. T. (2016). Métabolisme territorial : Typologie et caractérisation des systèmes de production dans les zones agro-écologiques du Sénégal. *MSc*. Université Gaston Berger de Saint Louis. p. 57.
- Ngom, B. (2013). Impact des trichogrammes (Hymenoptera : Trichogrammatoidae) et des bracons (Hymenoptera : Braconidae) sur la mineuse de l'épi du mil (Lepidoptera : Noctuidae) à Niore dans le bassin arachidier du Sénégal. *Mémoire de fin d'études*. Niamey, NIGER.: Centre Regional Agrhymet. p. 50
- Nwanze, K. F. (1981). Stem borers of cereals in Sahelian West Africa: relative importance and control. In *Biological control of insect pests of sorghum and pearl millet in west africa Biological control of pests : Its potentiel in west africa; Proceeding of an international conference; Feb 9-13* (pp. 115-123). Dakar, Sénégal: USAID Regional Food Crop Protection project.
- Nwanze, K. F. (1989). Insect pests of pearl millet in Sahelian West Africa I: *Acigona ignefusalis* (Pyralidae, Lepidoptera): distribution, population dynamics and assessment of crop damage. *Int. J. Pest Manage*, 35(2), 137-142.
- Nwanze, K. F. (1991). Components for the management of two insect pests of pearl millet in Sahelian West Africa. *Insect Sci Applic.*, 12(5/6), 673-678.
- Nwanze, K. F. (1997). Integrated management of stemborers of sorghum and pearl millet. *Insect Sci. Applic.*, 17(1), 1-8.
- Nwanze, K. F., & Harris, K. M. (1992). Insect pest of pearl millet in West Africa. *Rev. Agric. Entomol.*, 80(12), 1133-1155.
- Nwanze, K. F., & Sivakumar, M. V. K. (1990). Insect pests of pearl millet in Sahelian West Africa—II. *Raghuva albipunctella* De Joannis (Noctuidae, Lepidoptera): Distribution, population dynamics and assessment of crop damage. *Trop. Pest Manage*, 36(1), 59-65.
- Nwilene, F. E., Nacro S., Tamò M., Menozzi P., Heinrichs E. A., Hamadoun A., Dakouo D., Adda C. and Togola A. (2013). Managing insect pests of rice in Africa. In M. C. S. Wopereis & et-al. (Eds.), *Realizing Africa's Rice promise*. CAB International. 222-240.

- O'Neil, R. J., & Obrycki, J. (2009). Introduction and augmentation of biological control agents. In E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integrated pest management : Concepts, tactics, strategies and case studies*. Cambridge University Press: New York, USA. 107-115.
- Olivier, A. (1995). Le striga, mauvaise herbe parasite des céréales Africaines : biologie et méthodes de lutte. *Agronomie*, 15, 517-525.
- Ouali-N'Goran, S.-W. M., Tra, B. C. S., Umouni, D. M. A., et Tano, Y. (2017). Diversity and abundance of insect pests of corn (*Zea mays* Poaceae) grown in a rural environment in the city of MBahiakro (East Central Cte d'Ivoire). *J. Ecol. Nat. Environ.* 9, 77-86.
- Overholt, W. A. (2000). Lutte biologique. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 351-365.
- Overholt, W. A., Ngi-Song, A. J., Omwega, C. O., Kimani-Njogu, S. W., Mbapila, J., Sallam, M. N., & Ofomata, V. (1997). A review of the introduction and establishment of *Cotesia flavipes* Cameron in East Africa for biological control of cereal stemborers. *Insect Sci. Applic.*, 17(1), 79-88.
- Pawson, S. M., Brin, A., Brockerhoff, E. G., Lamb, D., Payn, T. W., Paquette, A., & Parrotta, J. A. (2013). Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers. Conserv.*, 22(5), 1203-1227.
- Payne, W., Tapsoba, H., Baoua, I. B., Ba, N. M., N'Diaye, M., & Dabire-Binso, C. (2011). On-farm biological control of the pearl millet head miner: realization of 35 years of unsteady progress in Mali, Burkina Faso and Niger. *Int. J. Agr. Sustain.*, 9(1), 186-193.
- Pedigo, L. P., & Buntin, G. D. (1994). Handbook of sampling methods for arthropods in agriculture. CRC Press: Boca Raton. p. 713.
- Perez-Alvarez, R., Nault, B. A., & Poveda, K. (2018). Contrasting effects of landscape composition on crop yield mediated by specialist herbivores. *Ecol. Appl.*, 28(3), 842–853.
- Polaszek, A. (1997). An overview of parasitoids of African lepidopteran cereal stemborers (Hymenoptera: Chrysidoidea, Ceraphronoidea, Chalcidoidea, Ichneumonoidea, Platygastroidea). *Insect Sci. Applic.*, 17(1), 17
- Polaszek, A., & Khan, Z. R. (2000). Les plantes hôtes. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 3-10.
- Popov, G. B., Launois-Luong, M. H., & Van Der Weel, J. (1990). Les oothèques des criquets du Sahel. *Collection Acridologie Opérationnelle*, 7, 93.
- Powell, J. A. (2009). Lepidoptera: moths, butterflies. In V. H. Resh & R. T. Cardé (Eds.), *Encyclopedia of Insects* (2<sup>nd</sup> ed.). Academic Press: San Diego. 559-587
- Prather, C. M., Pelini S. L., Laws A., Rives E., Woltz M., Bloch C. P., Toro I. D., Ho C.-K., Kominoski J., Newbold T. A. S., Parsons S. and Joern A. (2013). Invertebrates, ecosystem services and climate change. *Biol. Rev.*, 88, 327–348.
- Puttarudriah, M., & Channa Basavanna, G. P. (1956). A Study on the identity of *Bracon hebetor* Say and *Bracon brevicornis* Wesmael (Hymenoptera: Braconidae). *Bull. Entomol. Res.*, 47(1), 183–191.
- Quicke, D. L. J. (2009). Hymenoptera: Ants, Bees, Wasps. In V.H. Resh et R.T. Cardé (Eds.), *Encyclopedia of Insects*, (2nd ed.). Academic Press: San Diego. 473-484.
- Rana, N., Javed, S., Iqbal, M. Z., Rana, U. B., Ali, A., Maalik, S., et Afzal, S. (2017). Pest vs. predator communities in citrus orchards under ecological conditions of district Toba Tek Singh (Punjab), Pakistan. *J. Entomol. Zool. Studies*, 5(6), 481-489.
- Rango, J. J. (2005). Arthropod communities on creosote bush (*Larrea tridentata*) in desert patches of varying degrees of urbanization. *Biodivers. Conserv.*, 14(9), 2185-2206.

- Ratnavathi, C. V. (2017). Nutritional qualities & value addition of millets. In J. V. Patil (Ed.), *Millets and Sorghum: Biology and Genetic Improvement* (1st ed.). John Wiley & Sons, Ltd: New York, USA. 323-340.
- Razzaghi, B. F., Shabanali, F. H., Rezvanfar, A., & Pouratashi, M. (2011). Application of integrated pest management (IPM) practices by paddy farmers in Sari county of Mazandaran province, Iran. *Afr. J. of Agric. Res.*, 6(21), 4884-4892.
- Reddy, P. S. (2017). Pearl millet, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. In J. V. Patil (Ed.), *Millets and sorghum: biology and genetic improvement* (1st ed.). John Wiley & Sons, Ltd: New York, USA. 49-86.
- Reynolds, T. W., Waddington, S. R., Anderson, C. L., Chew, A., True, Z., & Cullen, A. (2015). Environmental impacts and constraints associated with the production of major food crops in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Food Secur.*, 7(4), 795-822.
- Risbec, J. (1950). La faune entomologique des cultures au Sénégal et au Soudan Français. Gouvernement général de l'Afrique Occidentale française: Jouve, Paris. p.638.
- Risbec, J. (1960). Les parasites d'insectes d'importance économique en Afrique Tropicale et à Madagascar. *Agron. Trop.*, 15(6), 624-656.
- ROCAFREMI. (2002). Etude de la Bio-écologie des insectes de l'épi et développement de méthodes de lutte à la portée des paysans. Réseau Ouest et Centre Africain de Recherche sur le Mil (ROCAFREMI): Niamey, Niger. p.33.
- Rodriguez-Saona, C., Kaplan, I., Braasch, J., Chinnasamy, D., et Williams, L. (2011). Field responses of predaceous arthropods to methyl salicylate: A meta-analysis and case study in cranberries. *Biol. Control*, 59(2), 294-303
- Rosenzweig, C., Iglesius, A., Yang, X. B., Epstein, P. R., & Chivian, E. (2001). Climate change and extreme weather events - Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change & Human Health*, 2(2), 90-104.
- Roth, M. (1980). Initiation à la morphologie, la systématique et la biologie des insectes. Route d'Aulnay - 931 40 BONDY: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM). pp. 259
- Rukhsana, K., & Sebastian, C. D. (2015). Genetic structure and molecular phylogeny analysis of *Bracon brevicornis* Wesmael, a larval parasitoid of coconut black headed caterpillar, *Opisina arenosella* Walker. *Res. Biotech.*, 6(3), 17–23.
- Saadat, D., Seraj, A. A., Goldansaz, S. H., & Karimzadeh, J. (2014). Environmental and maternal effects on host selection and parasitism success of *Bracon hebetor*. *BioControl*, 59(3), 297-306.
- Saha, D., et Mukhopadhyay, A. (2013). Insecticide resistance mechanisms in three sucking insect pests of tea with reference to North-East India: an appraisal. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 33, 46-70.
- Sarao, P. S., & Mahal, M. S. (2012). Evaluation of rice germplasm for resistance to a leaf folder stemborer and planthopper under field and glasshouse conditions in India *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 32(3), 126–135.
- Sarr, I. (1998). Détermination de l'impact potentiel des pesticides sur *Heliocheilus albipunctella* (mineuse de l'épi du mil) à partir d'une méthode indirecte, l'étude de la table de survie. In J. W. Everts, D. Mbaye, O. Barry, & W. Mullié (Eds.), *Effet de la lutte antiacridienne sur l'environnement* (Tome II). 109-144.
- SAS. (2003). SAS/STAT (Version 9.1 for Windows). SAS institute Inc., Cary, NC., USA.
- Saxena, H., Ponnusamy, D., & Asif Iquebal, M. (2012). Seasonal parasitism and biological characteristics of *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae) – a potential larval ectoparasitoid of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in a chickpea ecosystem. *Biocontrol Sci. Tech.*, 22(3), 305-318.

- Seshu Reddy, K. V. (2000). La lutte intégrée. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. pp. 313-320.
- Sharma, H. C. (1987). Host-Plant Resistance to Insect Pests in Pearl Millet. In J. R. Witcombe & S. R. Beckerman (Eds.), *Proceedings of the International Pearl Millet Workshop; 1986 Apr 7-11*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 297-298.
- Sharma, H. C., & Davies, J. C. (1988). Insect and other animal pests of millets. ICRISAT Center: Patancheru, India. p.165.
- Sharma, H. C., Sharma, S. P., & Munghate, R. S. (2013). Phenotyping for resistance to the sugarcane aphid *Melanaphis sacchari* (Hemiptera: Aphididae) in *Sorghum bicolor* (Poaceae). *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 33(4), 227-238.
- Sharma, R., Upadhyaya, H. D., Sharma, S., Gate, V. L., & Raj, C. (2015). New sources of resistance to multiple pathotypes of in the pearl millet mini core germplasm collection. *Crop Sci.*, 55(4), 1619.
- Singh, B. U., Sharma, H. C., & Rao, K. V. (2012). Mechanisms and genetic diversity for host plant resistance to spotted stem borer, *Chilo partellus* in sorghum, *Sorghum bicolor*. *J Appl Entomol.*, 136, 386-400.
- Smith-Gill, S. J. (1975). Cytophysiological basis of disruptive pigmentary patterns in the leopard frog *Rana pipiens*. *J. Morphol.*, 146(1), 35-54.
- Smith, S. M. (1996). Biological control with Trichogramma: Advances, successes, and potential of their use. *Anna Rev. Entomol.*, 41, 375-406.
- Soti, V., Thiaw, I., Debaly, Z. M., Sow, A., Diaw, M., Fofana, S., Diakhate, M., Thiaw, C. and Brévault, T. (2019). Effect of landscape diversity and crop management on the control of the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) by natural enemies. *Biological Control*, 129, 115-122.
- Southwood, T. R. E., & Henderson, P. A. (2000). Ecological methods (3rd ed.). Blackwell Science Ltd. p.593.
- Sow, A., Brévault T., Delvare G., Haran J., Benoit L., Cœur d'Acier A., Galan M., Thiaw C., Soti V. and Sembene M. (2018). DNA sequencing to help identify crop pests and their natural enemies in agro-ecosystems: The case of the millet head miner *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) in sub-Saharan Africa. *Biol. Control*, 121, 199-207.
- Sy, O. (2016). Caractérisation agro-morphologique et génétique d'une collection de mils locaux du Sénégal. *Thèse de Doctorat*. Université Cheikh Anta Diop de Dakar: Dakar, Sénégal. p. 136.
- Tanzubil, P. B. (2014). Effect of variety and nitrogen fertilization on insect pest incidence in Sorghum in the Sudan Savanna of Ghana. *J. Entomol. Zool. Stud.*, 2(6), 12-15.
- Tapsoba, H. (1991). Effet de l'association de cultures sur les fluctuations, les densités de populations et les dégâts des insectes inféodés à l'arachide, au niébé, au sorgho et au mil. *Mémoire de fin d'études*. Université de Ouagadougou. p.153.
- Teetes, G. L., Seshu-Reddy, K. V., Leuschner, K., & House, L. R. (1983). Sorghum insect identification handbook. *Information Bulletin*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 12, p.61.
- Thakur, R. P., Sharma, R., & Rao, V. P. (2011). Screening techniques for pearl millet diseases *Information Bulletin*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 89, p.56.
- Thiaw, C., Brévault T., Diallo N. F., Sow A., Ngom D., Soti V., Sarr I., Dorego G. S., Diop M., Cisse N. and Sembene M. (2017). Incidence et régulation naturelle de la chenille mineuse de l'épi de mil, *Heliocheilus albipunctella* De Joannis (Lepidoptera, Noctuidae) à Bambey dans le bassin arachidier au Sénégal. *Agronomie Africaine*, 29(2), 83-95.
- Tounou, A. K., Agboka, K., Agbodzavu, K. M., & Wegbe, K. (2013). Maize stemborers distribution, their natural enemies and farmers' perception on climate change and stemborers in southern Togo. *J. Appl. Biosci.*, 64, 4773-4786.

- Touré, K., & Yéhouéno, A. (1995). Les insectes de l'épi du mil en Afrique de l'Ouest. In K. F. Nwanze & O. Youm (Eds.), *Panicle insect pests of sorghum and pearl millet. Proceedings of an International Consultative Workshop; Oct 4-7 1993*. ICRISAT Sahelian Center: Niamey, Niger. 39-34.
- Valantin-Morison, M. (2012). Comment favoriser la régulation biologique des insectes de l'échelle de la parcelle à celle du paysage agricole pour aboutir à des stratégies de protection intégrée sur le Colza d'hiver? *OCL*, 19(3), 169-183
- Van Achterberg, C., & Walker, A. K. (2000). Famille Braconidae. In Polaszek A & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs de tiges de céréale en Afrique: importance économique, Systématique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 141-189.
- Van Den Berg, J., Nur, A. F., & Polaszek, A. (2000). Les pratiques culturales. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 335-350.
- Van Den Berg, J., & Nur, A. F. (2000). La lutte chimique. In A. Polaszek & G. Delvare (Eds.), *Les foreurs des tiges de céréales en Afrique : Importance économique, ennemis naturels et méthodes de lutte*. CIRAD: Toulouse, Paris. 321-334.
- Van Den Berg, J., Wenzel, W. G., & Van Der Westhuizen, M. C. (1994). Tolerance and recovery resistance of grain sorghum genotypes artificially infested with *Busseola fusca* (Fuller) (Lepidoptera: Noctuidae) *Insect Sci Applic.*, 15(1), 61-65.
- Van Emden, H. F., & Dabrowski, Z. T. (1994). Biodiversity and habitat modification in pest management. *Insect Sci. Applic.*, 15(6), 605-620.
- Van Lenteren, J. C. (Ed.). (2012). *IOBC Internet Book of Biological Control* (Version 6). p.182.
- Van Lenteren, J. C., & Overholt, W. A. (1994). Ecology and Integrated Pest Management. *Insect Sci. Applic.*, 15(6), 557-582.
- Van Mourik, T. A. (2007). *Striga hermonthica* seed bank dynamics: process quantification and modelling. *PhD thesis*. Wageningen University: Wageningen, The Netherlands. p.123.
- Vercambre, B. (1978). *Raghuva spp.* et *Masalia sp.*, chenilles des chandelles du mil en zone Sahélienne. *Agron. Trop.*, 33, 62-79.
- Wale, M., Schulthess, F., Kairu, E. W., & Omwega, C. O. (2006a). Distribution and relative importance of cereal stem borers and their natural enemies in the semi-arid and cool-wet ecozones of the Amhara State of Ethiopia *Ann. soc. entomol. Fr. (n.s.)*, 42(3-4), 389-402.
- Wale, M., Schulthess, F., Kairu, E. W., & Omwega, C. O. (2006b). Cereal yield losses caused by lepidopterous stemborers at different nitrogen fertilizer rates in Ethiopia. *J. Appl. Entomol.*, 130(4), 220-229.
- Wang, X.-G., Levy, K., & Daane, K. M. (2013). Evaluation of an indigenous parasitoid *Habrobracon gelechiae* (Hymenoptera: Braconidae) for biological control of light brown apple moth *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) in California. *Biocontrol Sci. Technol.*, 23(4), 433-447.
- Wonorahardjo, S., Nurindah, Sunarto, D. A., Sujak et Aprilia, S. A. (2018). Exploration of tritrophic interaction for enhancing conservation biological control of insect pest, the role of analytical chemistry. *Pertanika J. Sci. & Technol.*, 26(3), 1275-1288.
- Youm, O., & Gilstrap, F. (1993a). Life-fertility tables of *Bracon hebetor* Say (Hymenoptera: Braconidae) reared on *Heliocheilus albipunctella* de Joannis (Lepidoptera: Noctuidae). *Insect Sci Applic.*, 14(4), 455-459
- Youm, O., & Gilstrap, F. (1993b). Population dynamics and parasitism of *Coniesta (=Haimbachia) ignefusalis*, *Sesamia calamistis*, and *Heliocheilus albipunctella* in millet monoculture. *Insect Sci Applic.*, 14(4), 419-426.
- Youm, O., Harris, K. M., & Nwanze, K. F. (1996). *Coniesta ignefusalis*: a handbook of information. *Information Bulletin*. ICRISAT Center: Patancheru, India. 46, p. 60.

- Youm, O., & Owusu, E. (1998). Assessment of yield loss due to the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) using a damage rating scale and regression analysis in Niger. *Int. J. Pest Manage.*, *44*(2), 119-121.
- Zalucki, M. P., Clarke, A. R., et Malcolm, S.B. (2002). Ecology and behavior of first instar larval Lepidoptera. *Annu. Rev. Entomol.*, *47*, 361–39
- Zethner, O., & Laurence, A. A. (1988). The economic importance and control of the adult blister beetle *Psalydolytta fusca* Olivier (Coleoptera: Meloidae) *Int. J. Pest Manage*, *34*(4), 207-412.
- Zhang, F., Babendreier D., Wang Z. Y., Il K. S., Zheng L., Pyon Y. C., Bai S.-X., Song K., Ri J. O., Grossrieder M. and Kuhlmann U. (2010). Mass releases of *Trichogramma ostriniae* increase maize production in DPR Korea. *J. Appl. Entomol.*, *134*, 481–490.
- Zhao, Z., Shi, P., Men, X., Ouyang, F., & Ge, F. (2013). Effects of crop species richness on pest-natural enemy systems based on an experimental model system using a microlandscape. *Sci China Life Sci*, *56*(8), 758–766.
- Zoclanclounon, Y. A. B., Kanfany, G., Thiaw, C., Fofana, A., Mbaye, N., & Cisse, N. (2018). Assessment of pearl millet genotypes for downy mildew resistance and agronomic performance under field conditions in Senegal. *Int. J. Agric. Biol.*, *20*, 493-498.

**ANNEXE 1: Insectes capturés dans les parcelles de mil au centre sud du bassin arachidier pendant l'hivernage 2016.**

<b>Ordres</b>	<b>Familles</b>	<b>Espèces</b>	<b>Fonction**</b>	<b>Abondance (nombre)</b>	
COLEOPTERE	<b>Carabidae</b>	<i>Agonum ermagnatum</i>	Prédateur	192	
		<i>Anchomenus dorsalis</i>	Prédateur	279	
		<i>Basdister bullatus</i>	Prédateur	138	
		<i>Bembidion tetracolum</i>	Prédateur	149	
		<i>Bradycellus harpalinus</i>	Prédateur	68	
		<i>Calathus rotundicollis</i>	Prédateur	73	
		<i>Calosomas sycophanta</i>	Prédateur	275	
		<i>Chlaenius vestitus</i>	Prédateur	78	
		<i>Harpalus sp</i>	Prédateur	13	
		<i>Loricera pilicornis</i>	Prédateur	175	
		<i>Pterostichus oblongopunctatus</i>	Prédateur	2815	
		<b>Cetoniidae</b>	<i>Valgus hemipterus</i>	Ravageur	73
		<b>Chrysomelidae</b>	<i>Asbecesta senegalensis</i>	Ravageur	63
			<i>Platyphora decens</i>	Ravageur	138
	<b>Coccinelidae</b>	<i>Verania striata</i>	Prédateur	884	
	<b>Curculionidae</b>	<i>Alcides (Sternuchopsis) interruptus</i>	Ravageur	79	
	<b>Geotrupidae</b>	<i>Anoplotropes stercorosus</i>	Autre	11473	
		<i>Geotrupes stercorarius</i>	Autre	1732	
	<b>Meloidae</b>	<i>Cylindrothorax kulzeria</i>	Ravageur	466	
		<i>Mylabris afzelii</i>	Ravageur	410	
		<i>Mylabris pallipes</i>	Ravageur	524	
		<i>Psalydolytta fusca</i>	Ravageur	469	
		<i>Psalydolytta vestita</i>	Ravageur	329	
	<b>Scarabaeidae</b>	<i>Adenteus armigera</i>	Autre	4838	
		<i>Copris lunaris</i>	Autre	200	
		<i>Dichotomius ascanius</i>	Autre	367	
		<i>Anoxia (Melolontha) orientalis</i>	Ravageur	350	
		<i>Melolontha melolontha</i>	Ravageur	152	

Ordres	Familles	Espèces	Fonction**	Abondance (nombre)
		<i>Mimela aurata</i>	Ravageur	139
		<i>Polyphylla fullo</i>	Ravageur	90
		<i>Schizonycha africana</i>	Ravageur	724
		ENI*	Autre	201
	<b>Tenebrionidae</b>	<i>Pimelia sp</i>	Prédateur	1014
DERMAPTERE	<b>Forficulidae</b>	<i>Forficula senegalensis</i>	Ravageur	205
DIPTERE	<b>Asilidae</b>	<i>Stenopogon sp</i>	Prédateur	703
	<b>Muscidae</b>	<i>Musca xanthomelas</i>	Autre	62
		<i>Atherigona soccata</i>	Ravageur	39
	<b>Syrphidae</b>	<i>Ischiodon aegypticus</i>	Prédateur	2498
	<b>Tachinidae</b>	<i>Chetogena sp</i>	Parasitoïde	3190
		<i>Palexorista quadrizonula</i>	Parasitoïde	2093
		ENI*	Parasitoïde	272
HEMIPTERE	<b>Alydidae</b>	<i>Mirperus jaculus</i>	Ravageur	35
HYMENOPTERE	<b>Braconidea</b>	<i>Bracon sp</i>	Parasitoïde	161
	<b>Chalcididae</b>	<i>Cardiochiles sp</i>	Parasitoïde	47
	<b>Crabonidae</b>	<i>Bembix sp</i>	Prédateur	98
		<i>Cerceris sp</i>	Prédateur	132
	<b>Formicidae</b>	<i>Lasius fuliginosus</i>	Autre	174
		ENI*	Autre	110
	<b>Ichneumonidae</b>	<i>Ichneumon promissorius</i>	Parasitoïde	190
		<i>Ichneumon sp</i>	Parasitoïde	75
	<b>Mutillidae</b>	<i>Trogaspidia sp</i>	Prédateur	69
	<b>Pompilidae</b>	<i>Agenoïdeus sp</i>	Prédateur	9174
		<i>Batozenellis fulliginoseus</i>	Prédateur	624
		<i>Polytes sp</i>	Prédateur	54
		<i>Sycenetus sp</i>	Prédateur	45

Ordres	Familles	Espèces	Fonction**	Abondance (nombre)
	<b>Sphecidae</b>	<i>Ammophila sp</i>	Prédateur	165
		<i>ENI*</i>	Prédateur	147
	<b>Sphegidae</b>	<i>Sphex umbrosus</i>	Prédateur	98
	<b>Vespidae</b>	<i>Delta sp</i>	Prédateur	129
		<i>Oedunerus sp</i>	Prédateur	30
		<i>Syrevetus sp</i>	Prédateur	70
		<i>ENI*</i>	Prédateur	170
LEPIDOPTERE	<b>Arctiidae</b>	<i>Amsacta moloneyi</i>	Ravageur	606
		<i>Euplagia quadripunctaria</i>	Ravageur	230
		<i>Miltochrista miniata</i>	Ravageur	60
	<b>Crambidae</b>	<i>Chilo partellus</i>	Ravageur	40
		<i>Coniesta (Acigona) ignefusalis</i>	Ravageur	54
		<i>Cydalima perspectalis</i>	Ravageur	61
	<b>Noctuidae</b>	<i>Heliocheilus (Raghuva) albipunctella</i>	Ravageur	367
		<i>Heliocheilus (Raghuva) biocularis</i>	Ravageur	127
		<i>Masalia terracottoïdes</i>	Ravageur	389
		<i>Mythimna loreyi</i>	Ravageur	570
		<i>Chrysodeixis (Plusia) chalcites</i>	Ravageur	680
		<i>Sesamia cretica</i>	Ravageur	37
		<i>Spodoptera exempta</i>	Ravageur	970
	<b>Nolidae</b>	<i>Xanthodes sp</i>	Ravageur	821
	<b>Saturnidae</b>	<i>Saturnia (pyri) carpini</i>	Ravageur	455
	<b>Sphingidae</b>	<i>Mimastiliae sp</i>	Ravageur	148
		<i>Sphinx sp</i>	Ravageur	626
ORTHOPTERE	<b>Acrididae</b>	<i>Acanthacris ruficornis</i>	Ravageur	215
		<i>Acrida bicolor</i>	Ravageur	84
		<i>Cataloipus cymbiferus</i>	Ravageur	90
		<i>Chrotogonnus senegalensis</i>	Ravageur	1285

<b>Ordres</b>	<b>Familles</b>	<b>Espèces</b>	<b>Fonction**</b>	<b>Abondance (nombre)</b>
		<i>Eyprepocnemis plorans</i>	Ravageur	162
		<i>Kraussaria angulifera</i>	Ravageur	851
		<i>Locusta migratoria</i>	Ravageur	291
		<i>Nomadacris septemfasciata</i>	Ravageur	164
		<i>Oedaleus senegalensis</i>	Ravageur	98
		<i>Ornithacris turbida</i>	Ravageur	375
		<i>Paracinema tricolor</i>	Ravageur	240
		<i>Schistocerca gregaria</i>	Ravageur	27
		<i>Zonocerus variegatus</i>	Ravageur	128
<b>Total</b>	7 ordres	32 familles	92 espèces	60 080 insectes

\*=Espèce non encore identifiées. \*\*= la fonction autre regroupe les espèces d'importance économique mineure dans cette étude et composée essentiellement de détritivore, nécrophages, etc.



### **ANNEXE 3: Publications et communications scientifiques**

#### **Liste des publications**

Goudiaby, M. F., Sarr, I., et Sembene, M. (2018). Source of resistance in pearl millet varieties against stem borers and the ear headminer. *J. Entomol. Zool. Stud.*, 6(1), 1702-1708.

#### **Liste des Communications**

Goudiaby, M. F., Sarr, I., Ba, M. N., Sembene, M. et Muniappan, R. (2017). Optimization of the mass rearing of the parasitoid wasp *Bracon hebetor* Say (Hymenoptera : Braconidae) and the release protocols for the augmentative biological control of the millet headminer in Senegal. Présentation poster, **Atelier Sorghum and Millet Innovation Lab** du 6 au 9 mars à Mbour, Sénégal.

Goudiaby, M. F., Sarr, I., Ba, M. N., Sembene, M. et Muniappan, R. (2018). Efficacy of augmentative release of the parasitoids wasp *Bracon hebetor* against the pearl millet headminer. Présentation orale, **The 1st International Conference on Biological Control: Approches and Applications** du 27 au 29 septembre au Bangalore, Inde.



E-ISSN: 2320-7078  
P-ISSN: 2349-6800  
JEZS 2018, 6(1): 1702-1708  
© 2018 JEZS  
Received: 03-11-2017  
Accepted: 04-12-2017

MF Goudiaby

A) Department of Animal  
Biology, University of Cheikh  
Anta Diop, Av. Cheikh Anta  
Diop, Dakar, Senegal

B) Senegalese Agricultural  
Research Institute of Bambey,  
BP: 53 Bambey, Senegal

I Sarr

Senegalese Agricultural Research  
Institute of Bambey, BP: 53  
Bambey, Senegal

M Sembene

Department of Animal Biology,  
University of Cheikh Anta Diop,  
Av. Cheikh Anta Diop, Dakar,  
Senegal

Correspondence

MF Goudiaby

Senegalese Agricultural Research  
Institute of Bambey, BP: 53  
Bambey, Senegal

## Source of resistance in pearl millet varieties against stem borers and the ear headminer

MF Goudiaby, I Sarr and M Sembene

### Abstract

The most damaging pearl millet insect pests in Senegal include ear headminer (*Heliocheilus albipunctella*) and the complex of stem borers *Sesamia calamistis*, *Coniesta ignefusalis*, *Eldana saccharina* and *Busseola fusca*. To reduce damage and loss from these pests, resistant varieties would be most cost effective for smallholder farmers. Evaluation using Gawane, ISMI9507, Thialack2 varieties, IBV8004 as the resistant check and Souna3 as the susceptible check from the Senegalese of Agricultural Research Institute (ISRA) was conducted under natural infestation in the 2014 and 2015 cropping seasons. The results showed a low stem borer incidence and damage on Thialack2 and Gawane compared to Souna3. Thialack2 recorded a high incidence and damage by *H. albipunctella* but gave higher yields than the other varieties. The damages due to *H. albipunctella* on ISMI9507 and its grain yield were the lowest. It is suggested, Gawane contains a source of resistance to stem borers i.e. *S. calamistis* while Thialack2 also exhibited tolerance to *H. albipunctella* for which ISMI9507 would be resistance as well.

**Keywords:** pearl millet, *H. albipunctella*; stem borers; host resistance

### Introduction

Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) is one of the main cereal crops in West Africa where it is grown by smallholder farmers for their own consumption. It is a hardy crop capable of growing on low soil fertility and in extreme dry conditions [1]. It has good nutritional value including proteins, fibres, calcium and phosphorus [2]. Despite this importance, pearl millet is subjected to many abiotic and biotic stresses which can cause significant crop losses.

In Senegal, low yield levels ranging between 500 and 800kg/ha were recorded the last decade [3]. This is partly due to pests including the stem borers, *Coniesta ignefusalis* (Hampson), and the ear headminer, *Heliocheilus albipunctella* (De Joannis), which are the most damaging insect pests of pearl millet [1, 4-6].

Damage due to the ear headminer is characterized by larvae feeding on the floral structure or cutting and lifting the peduncles close to the rachis of the ear head and leaving spiral pattern behind on the ear heads. This can lead to yield loss up to 85% due to flower abortion or grain spilling [7-9].

For stem borers, after boring in the pearl millet stalks their feeding can kill whorl leaves i.e. deadhearts which is the most severe damage caused by the first generation of the pest. Later infestations by stem borers lead to retarded plant growth, reduced flowering and thus reduced grain production. Late infestations also cause flower abortion or chaffy grains and broken stalks due to larvae feeding as they destroy the apical tissues and vessels transporting the plant sap [4, 10]. Pearl millet stem borer damage vary between regions from 14% up to total crop failure for *C. ignefusalis* [1, 4, 6, 11].

The use of resistant or tolerant varieties as a first line of defence in integrated pest management for reducing damage due to insect pests is one of the cheapest and the most environmentally friendly alternative control method [1, 12-14].

The objective of our research is to assess the resistance of different pearl millet varieties screened against stem borers and headminer.

### Materials and Methods

#### Location

This study was conducted at the Senegalese Agricultural Research Institute (ISRA) of Niordu Rip (13°45' N 15°48' W, altitude 28m) during the cropping season of 2014 and 2015. The experimental site is located in the Senegalese peanut basin, the main pearl millet production area with a high level of pest pressure.

Rainfall data was collected from the ISRA Nioro du Rip weather station.

**Varieties**

The varieties Gawane, ISMI 9507 and Thalack2 bred from the National Agricultural Research Centre of Bambey were evaluated with IBV8004 and Souna3 as resistant and susceptible checks respectively [15].

**Experimentation**

The experimental design randomized complete block (RCB) with three replicates was used. Each plot was of 69 m x 40.5 m including border rows and with a sampling subplot of 11.5 m x 11.5 m for each variety. Seeds were sown after the first significant rain using 6 grains per hill and plants were thinned to three plants two weeks later i.e. a density of 36,000 plants/ha. Top dressing was done using a complex fertilizer (NPK 15.15.15) one week after seedling germination at 150 kg ha<sup>-1</sup>. Urea (50%N) at a rate of 50 kg ha<sup>-1</sup> was applied into two shares at two weeks after seedling germination and at two weeks later. Weeding was done manually as needed.

**Sampling**

Sampling of stalks and ear heads was conducted weekly from pearl millet jointing to maturity. To identify stem borers, stalks were cut and taken to the lab for incubation. For the headminer the ear heads were directly observed in the field. For each sampling date and from each treatment five hills were randomly selected and data collected on the number of infested stalks and ear heads, insect larvae, deadhearts, stalk holes, mines and their length as well as thousand grain weight and yield of the varieties.

**Estimate of variables**

The incidence (I) of headminer and stem borers was estimated using the following formula.

$$I(\%) = \frac{\text{Number of infested plants}}{\text{Total number of sampled plants}} \times 100$$

The damage and grain loss estimates due to the headminer were based on the number and length of the mines. The determination of those grain losses was done using the method of Jago [16] based on the number of mines per ear head classified in categories from 1 to 3 where 1= 1 mine; 2= 2-3 mines and 3= 4 mines and more. Based on these categories, the sampled ear heads from the field were grouped into three classes of grain losses where class1, class 2 and class 3 corresponded to 1 g of grain loss; 2.5 g of grain loss and 4 g of grain loss respectively.

The grain losses (GL) were estimated using the formula.

$$GL(\%) = \frac{\text{Weight loss for each variety (Kg)}}{\text{Grain production for each variety (Kg)}} \times 100$$

**Statistical analysis**

An ANOVA was conducted for the different variables using a General Linear Model (GLM) with Student Newman Keuls test for mean separation at a probability level  $\alpha=0.05$ . Prior to the analysis of variance and for eliminating heteroscedasticity, data were transformed using  $\arcsine \sqrt{i} / 0.5$  and  $\log_{10}(X + 1)$  where  $i$  = percentage of the incidence or deadhearts or grain loss and  $X$ = other considered count variables (number of larvae, number of mines, length of the mines, number of holes).

All analyses were performed using the software SAS 9.1 [17]. Except for rainfall and the stem borer composition, all results in the text are presented as mean  $\pm$  standard error.

**Results**

**Rainfall pattern**

The rainfall was lower in 2014 with a dry spell noted during the last three weeks of June. The rainfall was more abundant and better distributed during the 2015 cropping season.

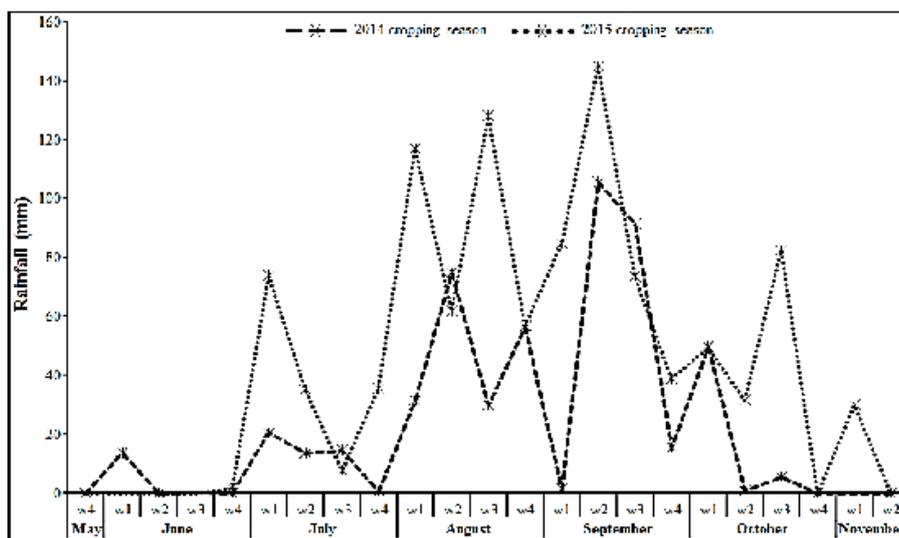


Fig 1: rainfall recorded in Nioro research station in 2014 and 2015 cropping seasons. W = Week

**Incidence of stem borers and headminer**

The incidence of the pearl millet headminer and stem borers in the tested varieties for 2014 and 2015 cropping seasons is shown in Figure 2. The headminer incidence was higher than

the incidence of stem borers in both years. In 2014, the incidence of stem borers was low and showed no significant difference between tested varieties. A similar result was noted for the incidence of the headminer for the same time period

(Figure 2a). In contrast, the stem borer incidence in 2015 was higher with a significant difference between varieties ( $P < 0.05$ ). The lowest incidence of  $28 \pm 4\%$  of infested plants was noted with Thialack2 compared to ISMI9507, Souna3 and Gawane for which the incidence ranged between  $31 \pm 3\%$  and  $33 \pm 3\%$ . The resistant check, IBV8004 was the least infested with  $20 \pm 3\%$  of the stalks affected in comparison to

the tested varieties (Figure 2b). For the headminer, the incidence in 2015 was significantly lower for the ISMI9507 with  $32 \pm 6\%$  of the ear heads mined compared to IBV8004, Gawane and Souna3 for which the infestations ranged between  $41 \pm 6\%$  and  $47 \pm 4\%$ . The highest headminer incidence was recorded in Thialack2 with  $56 \pm 7\%$  of plants mined (Figure 2b).

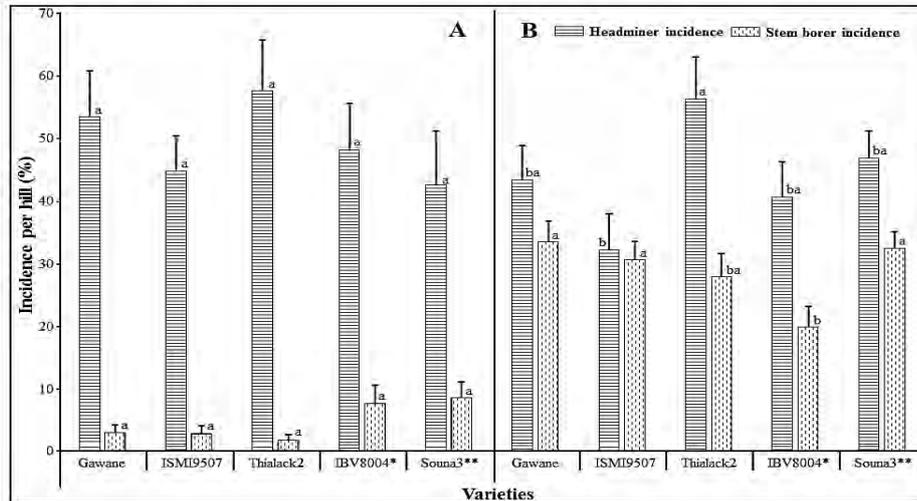


Fig 5: Mean ( $\pm$ SE) number of ear headminer larvae and mines and length of mines in the different pearl millet varieties in 2014 (A) and 2015 (B) cropping seasons. Means followed by the same letters are not significantly different. \*Resistant check; \*\* Susceptible check

**Stem borer larval density and damage**

The stem borer larvae density and damage in terms of holes and dead stalk or deadheart were variable in both two years and particularly low for 2014 compared to 2015 (Figure 3).

For the cropping season 2014, the deadhearts were only noted on ISMI9507 and Gawane varieties with a low level of dead plants estimated at nearly 3% of the sampled hills. Nevertheless, no significant difference was noted between the varieties for the density of stem borer larvae and damage (Figure 3a). In contrast to 2015, the density of the stem borers

larvae and damage were higher for all varieties, particularly Thialack2, Gawane and ISMI9507 which showed larval densities per hill varying from  $8.40 \pm 1.46$  to  $12.07 \pm 1.84$  as well as the holed stalks per hills ranging between  $12.40 \pm 3.13$  and  $15.20 \pm 2.35$ . The larval density per hill and the number of holed stalks of  $6.53 \pm 1.19$  and  $7.60 \pm 1.39$  respectively were significantly lower for the resistant check IBV8004. Thialack2 recorded on average 9% of deadhearts per hill which was higher than the deadhearts exhibited by ISMI9507, Souna3, Gawane and IBV8004 (Figure 3b).

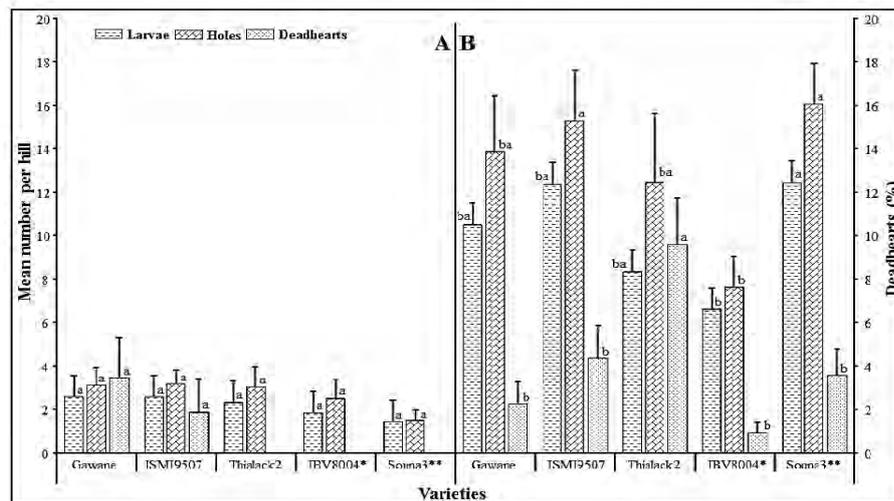


Fig 3: Mean ( $\pm$ SE) number of stem borers larvae, holes and deadhearts in the different pearl millet varieties in 2014 (A) and 2015 (B) cropping seasons. Means followed by the same letters are not significantly different. \*Resistant check; \*\* Susceptible check

**Stem borer composition**

The pearl millet stem borer, *Coniesta ignefusalis*, the African pink borer, *Sesamia calamistis*, the African stalk borer, *Busseola fusca* and the African sugar cane borer, *Eldana saccharina*

were the only stem borers recorded. The most frequently recovered species during the cropping seasons of 2014 and 2015 were *S. calamistis* and *C. ignefusalis* with 31-72% and 16-53% respectively (Figure 4).

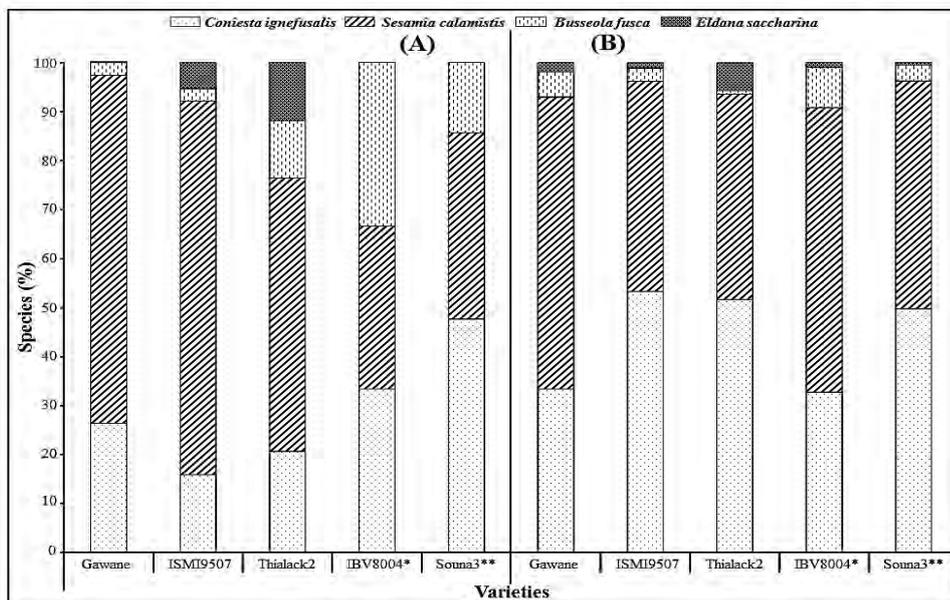


Fig 4: Stem borers composition in the different pearl millet varieties in 2014 (A) and 2015 (B) cropping seasons. \*Resistant check; \*\* Susceptible check

**Headminer larval density and damage**

A more significant natural infestation of pearl millet by the headminer was noted in 2015 compared to 2014. The density of the headminer larvae and the number of mines as well as their length did not show a significant difference for the tested varieties in 2014 (Figure 5a). As for 2015, Thialack2 recorded more larvae, more mines and longer mines compared to the

other tested varieties in average of 7.40±1.03 larvae per hill, 13.27±1.87 mines per hill and 5.75±1.14 cm per mine. ISMI9507 had the lowest larval density, number and length of mines with 3.20±1.32 larvae per hill, 5.87±1.38 mines per hill and 2.49±0.67 cm per mine. However, this was comparable to the resistant check, IBV8004. Gawane and the susceptible check Souna3 were equally damaged (Figure 5b).

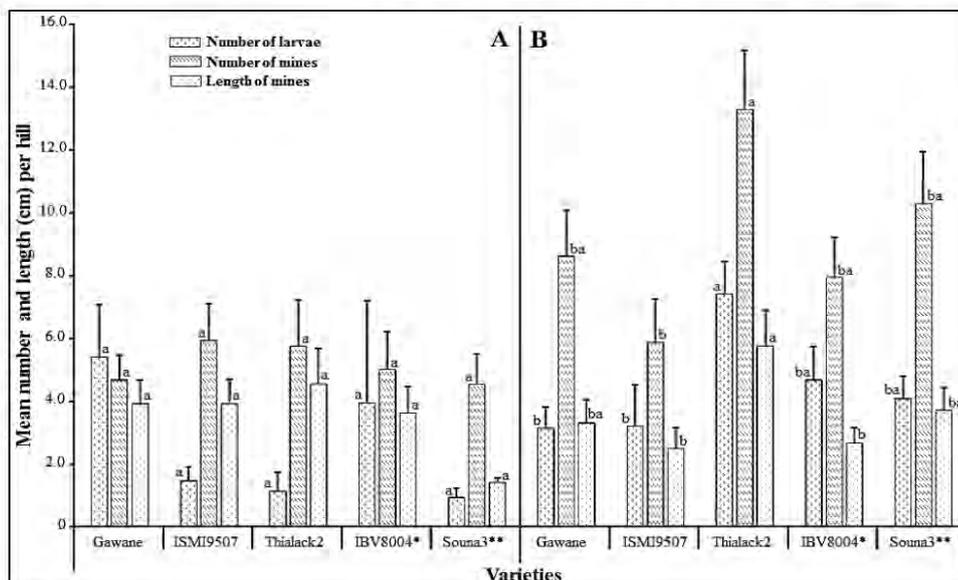


Fig 5: Mean (±SE) number of ear headminer larvae and mines and length of mines in the different pearl millet varieties in 2014 (A) and 2015 (B) cropping seasons. Means followed by the same letters are not significantly different. \*Resistant check; \*\* Susceptible check.

**Yield and grain yield loss**

The grain yield of the different varieties tested was higher in 2015 but the 1000 grain weight was higher in 2014 (Table 1). The grain yield loss was low for both cropping seasons with a

slightly better situation in 2014. Within a cropping season, no significant difference was noted between varieties for yield, yield loss and 1000 grain weight (Table 1).

**Table 1:** Grain yield parameters and loss in the different pearl millet varieties in 2014 and 2015 cropping seasons. For each year means followed by the same letters are not significantly different. \*Resistant check; \*\* Susceptible check.

Cropping seasons	Varieties	Mean ± SE		
		1000 Grain yield (g)	Grain yield (t/ha)	Grain yield loss (%)
2014	Gawane	11.27±0.33a	1.50±0.14a	3.64±0.46a
	ISMI9507	10.96±0.26a	1.40±0.09a	4.24±0.59a
	Thialack2	10.33±0.28a	1.83±0.31a	3.40±0.69a
	IBV8004*	10.77±0.25a	1.47±0.14a	3.45±0.29a
	Souna3**	10.66±0.49a	1.54±0.17a	3.50±0.43a
2015	Gawane	8.71±0.42a	1.70±0.23a	2.90±1.12a
	ISMI9507	7.73±0.04a	1.62±0.11a	2.25±0.61a
	Thialack2	7.62±0.28a	1.86±0.01a	3.80±0.43a
	IBV8004*	8.07±0.11a	1.94±0.46a	2.26±0.14a
	Souna3**	7.75±0.15a	2.31±0.24a	2.37±0.38a

**Discussion**

For all parameters recorded in 2014 cropping season, the behaviour of all varieties was similar with a slight variation in 2015. This might be related to the low population of the pests and the erratic rainfall in 2014 compared to 2015. Other factors affecting damage by insects could be population density, year or time of occurrence, unstable cultivated habitats and the production cycle of host varieties [18, 19]. During the two years of investigation, the incidence of stem borers was lower than the incidence of the headminer. This is generally noted on pearl millet as far as these two pests are concerned [6].

Considering overall behaviour, Thialack2 and Gawane exhibited resistance to stem borers. The incidence of stem borer larvae and holed stalks was very low compared to the susceptible check Souna3. For Thialack2, earliness may have played an important role in the mechanism of resistance. Previous research has shown that for stem borers early maturing varieties are less damaged than late maturing varieties [1, 20]. For Gawane leaf trichomes could be preventing easy egg laying for the stem borers as well as normal growth and development for the young larvae *i.e.* physico-chemical resistance to insects [1, 10, 21, 23, 24]. A Zongo pearl millet variety tested resistant at ISRA Bambey excreted a sticky liquid which killed larvae in the tunnels by drowning them [25]. Additionally, in cereals deadhearts are mostly caused by the shootfly (*Atherigona soccata*, Rondani Diptera: Muscidae) on seedlings or stem borers on young plants during early infestations up to the flowering stage for the late infestations. This explained why Sarao and Mahal found a strong correlation between plant height and percentage of deadhearts [22]. Also, *S. calamistis* was the most abundant over the two years of research as it is mostly occurring later in cropping seasons [26]. These findings contrast with many studies of Nwanze, Harris, Youm, Kfir, Overholt, Khan and Polaszek where *C. ignefusalis* dominated in pearl millet in West Africa. But this may be partly due to a shift in the rainfall pattern [1, 4, 27]. For *B. fusca* and *E. saccharina*, they occur rarely on pearl millet [27-30].

For headminer, Thialack2 exhibited more susceptibility to infestations but with its capacity to compensate for early ear damage and injury as well as its long and compact ears and its high 1000 grain weight, its yield was relatively better than those of the other varieties [31]. Damages by the stem borers may also be compensated by the production of additional stalks by Thialack2, similar to the response in sorghum when

infested by *B. fusca* [32]. Additionally, the deadheart and plant height exhibits direct positive effects on yield if the new stalks are not stressed by water and nutrient deficiency [10].

For ISMI9507 the incidence of the headminer, its larval density and lower damage in 2015 seem to indicate a source of resistance to this panicle pest due to the morphology of the ear or the variety earliness creating unfavourable establishment conditions for the young larvae [14, 33].

Nevertheless, other stress factors such as bristle beetle damage among others [18] may have contributed to a reduction in yield of the tested varieties compared to their potential of 2 to 3 metric tons per hectare ( $t\ ha^{-1}$ ). In 2014, the rainfall distribution within months, the water stress which occurred after the sowing and the late infestation by stem borers may have led to low 1000 grain weight as the panicle abortion increased with the increase in holed stalks [34].

**Conclusion**

All parameters monitored including yield of the different varieties compared to the checks in overall, suggested Gawane and Thialack2 possess a source of resistance to stem borers. Thialack2 exhibited additional tolerance to the headminer leading to a reduction in crop loss. ISMI9507 also showed good resistance to the headminer even though the actual yield was relatively low compared to the potential yield due to its susceptibility to others limiting factors.

**Acknowledgements**

We thank Tamsir Mane, Baba Fall and El Hadji Malick Ndiaye from the entomology laboratory of Niore du Rip for their assistance in the field as well as Prof. Gary Peterson from Texas Agrilife for revising the early version of the manuscript.

This work was funded by the West African Agricultural Productivity Program of Senegal (WAAPP 2A).

**References**

1. Nwanze KF, Harris KM. Insect pest of pearl millet in West Africa. Review of Agricultural Entomology. 1992; 80(12):1133-1155.
2. Obeng E, Cebert E, Ward R, Nyochembeng LM, Mays DA, Singh HP *et al.* Insect incidence and damage on pearl millet (*Pennisetum glaucum*) under various nitrogen regimes in Alabama. Florida Entomologist. 2015; 98(1):74-79.
3. DAPSA. Résultats définitifs de la campagne agricole

- 2014-2015. Ministère de l'Agriculture et de l'équipement rural, Senegal, 2016.
4. Youm O, Harris KM, Nwanze KF. *Coniesta ignefusalis*: a handbook of information. Information Bulletin, N° 46, International Crops Research Institute for the Semi -Ar id Tropics (ICRISAT), Patancheru, AP 502 324, India, 1996, 60.
  5. Youm O, Kumar KA. Screening and breeding for resistance to millet headminer. In: Nwanze, K.F. and Youm, O., (Eds). Panicle insect pests of sorghum and pearl millet. Proceedings of an International Consultative Workshop. International Crops Research Institute for the Semi -Ar id Tropics (ICRISAT), Niamey, Niger, 1995, 201-210.
  6. Nwanze KF. Components for the management of two insect pests of pearl millet in Sahelian West Africa. *Insect Science and its Application*. 1991; 12(5, 6):673-678.
  7. Payne W, Tapsoba H, Baoua IB, Ba NM, N'Diaye M, Dabire-Binso C. On-farm biological control of the pearl millet head miner: realization of 35 years of unsteady progress in Mali, Burkina Faso and Niger. *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2011; 9(1):186-193.
  8. Youm O, Owusu E. Assessment of yield loss due to the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) using a damage rating scale and regression analysis in Niger. *International Journal of Pest Management*. 1998; 44(2):119-121.
  9. Bal AB. Etude du parasitisme naturel d'*Heliocheilus albipunctella* de Joanis (Lépidoptère: Noctuidae) par *Trichogrammatoidea* *sp* (Hyménoptère: Trichogrammatoidea) à Bambey. *Insect Science and its Application*. 1993; 14(2):221-223.
  10. Singh BU, Sharma HC, Rao KV. Mechanisms and genetic diversity for host plant resistance to spotted stem borer, *Chilo partellus* in sorghum, *Sorghum bicolor*. *Journal of Applied Entomology*. 2012; 136:386-400.
  11. Drame-Yaye A, Youm O, Ayertey JN. Assessment of grain yield losses in pearl millet due to the millet stemborer, *Coniesta ignefusalis* (HAMPSON). *Insect Science and its Application*. 2003; 23(3):259-265.
  12. Gray ME, Ratcliffe ST, Rice ME. The IPM paradigm: concepts, strategies and tactics. In: *Integrated pest management: Concepts, tactics, strategies and case studies* (Radcliffe EB, Hutchison WD, Cancelado RE., eds), Cambridge University Press: NY, USA. 2009, 1-13.
  13. Sharma HC, Taneja SL, Kameswara Rao N, Prasada Rao KE. Evaluation of sorghum germplasm for resistance to insect pests. Information Bulletin N° 63, International Crops Research Institute for the Semi -Ar id Tropics (ICRISAT), Patancheru, AP 502 324, India. 2003, 184.
  14. Sharma HC. Host-Plant Resistance to Insect Pests in Pearl Millet. In: Witcombe, J.R. and Beckerman, S.R. (Eds). Proceedings of the International Pearl Millet Workshop, ICRISAT, Patancheru, AP 502 324, India. 1987, 297-298.
  15. Gupta SC. The pearl millet improvement program in Senegal. Institut Sénégalaise de la Recherche Agricole (ISRA), Bambey, Sénégal, 1986, 83.
  16. Jago ND. Millet Crop-Loss Assessment Methods. NRI Bulletin, NRI, Chatham, UK, 1993; 62:75.
  17. SAS, SAS/STAT. SAS institute Inc., Cary, NC., USA, 2003.
  18. Lale NES, Sastawa BM. Evaluation of host plant resistance, sowing date modification and intercropping as methods for the control of *Mylabris* and *Coryna* species (Coleoptera: Meloidae) infesting pearl millet in the Nigerian Sudan savanna. *Journal of Arid Environment*, 2000; 46:263-280.
  19. Touré K, Yéhouéno A. Les insectes de l'épi du mil en Afrique de l'Ouest. In: Nwanze, K.F. and Youm. O. (Eds). Panicle insect pests of sorghum and pearl millet. Proceedings of an International Consultative Workshop. ICRISAT, Niamey, Niger. 1995, 39-4.
  20. Nwanze KF. Insect pests of pearl millet in Sahelian West Africa I: *Acigona ignefusalis* (Pyrilidae, Lepidoptera): distribution, population dynamics and assessment of crop damage. *International Journal of Pest Management*. 1989; 35(2):137-142.
  21. Sharma HC, Sharma SP, Munghate RS. Phenotyping for resistance to the sugarcane aphid *Melanaphis sacchari* (Hemiptera: Aphididae) in *Sorghum bicolor* (Poaceae). *International Journal of Tropical Insect Science*. 2013; 33(4):227-238.
  22. Sarao PS, Mahal MS. Evaluation of rice germplasm for resistance to a leaf folder stem borer and planthopper under field and glasshouse conditions in India. *International Journal of Tropical Insect Science*. 2012; 32(3):126-135.
  23. Kumar H. Overview of research on mechanisms of resistance in maize to spotted stem borer. In: Mihm J.A. (Ed). *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization*. Proceedings of an International Symposium, CIMMYT, Mexico, D.F. 1997, 70-81.
  24. Khan ZR. A Review of entomological techniques and methods used to determine mechanisms and bases of stem borer resistance in maize. In: Mihm J.A. (Ed). *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization*. Proceedings of an International Symposium, CIMMYT, Mexico, D.F. 1997, 62-69.
  25. Ndoye M. Synthèse de quelques résultats sur les insectes foreurs des mil et sorgho. Institut Sénégalaise de la Recherche Agricole (ISRA), Bambey, Sénégal, 1977, 15.
  26. Bekoye BM, Dadie A. Evaluation des pertes en grains de mil dues aux insectes. *European Scientific Journal*. 2015; 11(21):266-275.
  27. Kfir R, Overholt WA, Khan ZR, Polaszek A. Biology and management of economically important lepidopteran cereal stem borers in africa. *Annual Review of Entomology*. 2002; 47:701-731.
  28. Kodjo TA, Komi A, Mawufe AK, Komlan W. Maize stemborers distribution, their natural enemies and farmers' perception on climate change and stemborers in southern Togo. *Journal of Applied. Bioscience*. 2013; 64:4773-4786.
  29. Nwanze KF. Integrated Management of Stemborers of Sorghum and Pearl Millet. *Insect Science and its Application*. 1997; 17(1):1-8.
  30. Matama-Kauma T, Kyamanywa S, Ogwang JA, Omwega CO, Willson HR. Cereal stemborer species complex and establishment of *Cotesia flavipes cameron* in eastern uganda. *Insect Science and its Application*. 2002; 21(4):317-325.
  31. Vercambre B, Raghava spp, et Masalia sp. chenilles des chandelles du mil en zone Sahélienne. *Agronomie Tropicale*. 1978; 33:62-79.
  32. Van Den Berg J, Wenzel WG, Van Der Westhuizen MC. Tolerance and recovery resistance of grain sorghum genotypes artificially infested with *Busseola fusca*

Mame Fatoumata Goudiaby<sup>1,2</sup> Ibrahima Sarr<sup>2</sup> Malick Niango Ba<sup>3</sup> Mbacke Sembene<sup>1</sup> Rangswamy Muniappan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Cheikh Anta Diop University, Av. Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal; <sup>2</sup>Senegalese Agricultural Research Institute of Bambey, Senegal; <sup>3</sup>International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Niamey, Niger; <sup>4</sup>Office of International Research, Education and Development, 526 Price Fork Road (0378) Blacksburg, VA 24061, USA  
SMIL Annual Review Meetings, 6-9 mars 2017 à Mbour, Sénégal.

## Introduction

Pearl millet is one of the main cereal staple food in the Sahel. It is grown by the smallholder farmers for their household own consumption. It is a hardy crop which can grow on low soil fertility and in extreme drought conditions (Nwanze and Harris, 1992). It has a high level of nutrients such as plant proteins, fiber, calcium and phosphorus (Obeng *et al.* 2015).

Despite this importance and its adaptation in harsh climatic conditions, pearl millet is burdened by damage due to the millet headminer (MHM) *Heliocheilus albipunctella* (Fig. 1) which can cause high yield losses estimated up to 85% at field level (Payne *et al.* 2011).

Control methods included the biological control with the use of the parasitoid wasp *Bracon hebetor* (Fig. 2) which remains one of the best alternatives. However, an effective use of biological agents requires accurate knowledge on their mass production and release parameters.

This study is in this framework.

### Objectives

- To assess the performance of *Bracon hebetor* when reared on *Ephestia kuheniella* fed on different diets.
- To determine the optimal field release period for *Bracon hebetor*.



Figure 1: Female adult of MHM and larvae feeding on millet head. Figure 2: Female adult of *B. hebetor* and MHM parasitized larvae.

## Material and methods

### 1. Study site

The study was conducted in Southern peanut basin of Senegal during the 2016 cropping season.

### 2. Mass rearing

The factitious host, *Ephestia kuheniella* from ISRA Nioro reared on 20g millet grain based diet containing millet, sorghum, peanut, cowpea at different proportion in flour form (5%, 20%, 35%, 50%) was used to mass rear the wasp, *B. hebetor*.

### 3. *B. hebetor* efficacy tests

*E. kuheniella* larvae from the different diet were exposed to *B. hebetor* (3♀ and 2♂) to be parasitized (Fig. 4). After hatching, male and female progeny of *B. hebetor* were counted.



Figure 4: *E. kuheniella* larvae parasitized by *B. hebetor*.

### 4. Field release

For this, 20 larvae of *E. kuheniella* were exposed to 3♀ and 2♂ of *B. hebetor* for 48 hours. Parasitized larvae kept in jute bags were taken to the field and hang on 3 stakes or release points in each plot (Fig. 3).

In the overall, 24 villages were selected within 2 blocs containing each 12 villages randomly selected. Each bloc was also divided into 4 sets or treatment of 3 villages.



Figure 3: release system.

- In the 1<sup>st</sup> bloc the release was made at different time of MHM cycle and the 4 treatments consisted of : no release (T0); release 1 month after first capture of MHM adults in the light trap (T1); 2 weeks after the first release (T2) and 4 weeks after the first release (T3).
- In the 2<sup>nd</sup> bloc the release was made at different millet growing stage and the 4 treatments consisted of : no release (T0); release at vegetative stage (T1); release at flowering stage (T2) and release at filling stage (T3).

## Result and discussion

### 1. Effectiveness of *B. hebetor* on *E. Kuheniella* larvae fed with different diets

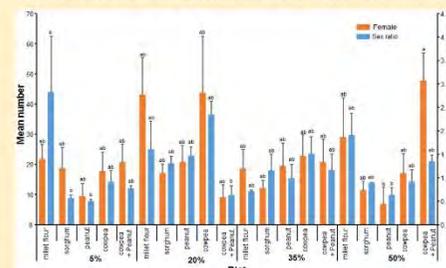


Figure 5: Progeny and sex ration of *Bracon hebetor* reared on *Ephestia kuheniella* fed on different diets with the pearl millet grains as basis.

The results showed that, the mean number of female progeny was very important (48 females) in the diet with 50% cowpea and 50% peanut flour with a sex ratio of 1:1. Larvae from diet with 20% millet flour and the one with 20% cowpea produced also 43 and 44 females respectively and a sex ratio of 2:1 which is biased in favor of the females. A highly significant sex ratio (3:1) were noted in the 5% millet flour diet but the number of female progeny was less important (22 females) than the diets cited above (Fig. 5).

### 3. Incidence of the millet headminer and parasitism by *B. hebetor* after release

In all treatments the incidence of MHM was important and variable. It ranged from 38% to 65% across all treatments (Fig. 4). This would be expected for insects incidence which varies significantly in unstable ecologies like agricultural systems influenced by the varieties as well as the insect density in fields (Lale and Sastawa, 2000).

The release according to MHM life cycle produced a highly significant parasitism rate (70%) in T2 while the parasitism level was higher in T3 when the release was made at different millet growing stage but no significant different was noted with the other treatments in the same bloc (Fig. 6).

In fact, *B. hebetor* parasitism rate depends on MHM larval stage even though it can parasitized all stages. The parasitism by *B. hebetor* is higher when the appropriate larval stages of insects are exposed (Akinkulore *et al.*, 2009).

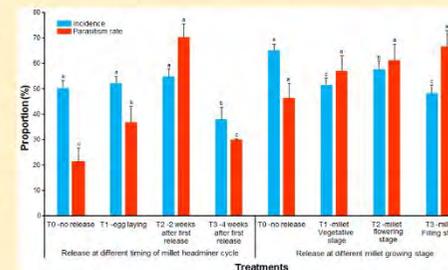


Figure 6: Millet headminer incidence and parasitism level in the different treatments.

## Conclusion

The optimum diet for rearing *B. hebetor* was the mixture of millet grain and 20% cowpea which was comparable to the diet using millet grain and 20% millet flour. The 2 approaches for the release of *B. hebetor* based on time after the first capture of MHM adult or the crop growth stage are similar. The millet filling stage is the optimal release period. It coincided with the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> larval stage of the millet headminer.

## References

Akinkulore RO, Boyer S, Chen H, and ZHANG H. (2009). Parasitism and host-location preference in *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae): role of refuge, choice, and host instar. *J Econ. Entomol.* 102(2): 610-615  
Lale NES and Sastawa BM. (2000). Evaluation of host plant resistance, sowing date modification and intercropping as methods for the control of *Mylabris* and *Coryna* species (Coleoptera: Meloidae) infesting pearl millet in the Nigerian Sudan savanna. *J Arid Environ.* 46:263-280.  
Nwanze KF and Harris KM (1992). Insect pest of pearl millet in West Africa. *Review of Agricultural Entomology*, 80(12):1133-1155.  
Obeng E, Cebert E, Ward R, Nyochembeng LM, Mays DA, Singh HP, Singh BP. 2015. Insect incidence and damage on pearl millet (*Pennisetum glaucum*) under various nitrogen regimes in Alabama. *Florida Entomologist*, 92(1):74-79.  
Payne W, Tapsoba H, Baoua I B, Ba N M, N'diaye M, Dabire-Binsou C. 2011. On-farm biological control of the pearl millet headminer: realization of 35 years of unsteady progress in Mali, Burkina Faso and Niger. *Int J Agr Sustain.* 9(1):188-193.

**Auteur: Mame Fatoumata Goudiaby**

## Résumé

Le mil (*Pennisetum glaucum*), est une importante céréale au Sénégal où il est développé par les petits producteurs essentiellement pour leur autoconsommation. Toutefois, les rendements en milieu paysan sont faibles (500-800kg/ha) à cause de nombreux facteurs y compris les dégâts d'insectes ravageurs. Pour aborder ce problème et contribuer à l'amélioration de la production du mil, ce travail de thèse a été entrepris principalement pour: caractériser la diversité et l'abondance des insectes en général dans l'agro-écosystème du mil; déterminer la distribution, l'incidence et les dégâts des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi ainsi que le niveau de leur parasitisme naturel et l'impact des pratiques culturales; évaluer la régulation des foreurs de tige et de la mineuse de l'épi par la plante de mil et par le lâcher augmentatif de parasitoïdes larvaires. Cette thèse a été conduite pendant 4 saisons (2013 - 2016) dans le centre sud du bassin arachidier du Sénégal. L'abondance et la diversité des insectes dans l'agroécosystème du mil ont été caractérisées pendant la saison culturale de 2016. Globalement, il est ressorti une grande diversité d'insectes avec 92 espèces réparties dans 32 familles et 7 ordres. Différentes communautés d'insectes ont été rencontrées y compris les ravageurs et ennemis naturels avec une certaine variabilité où les ravageurs étaient plus abondants. Parmi les ravageurs, *Mylabris pallipes*, *Spodoptera exempta* et *Kraussaria angulifera* ont été rencontrés avec la plus grande fréquence. Pour les ennemis naturels, une trentaine d'espèces de parasitoïdes et de prédateurs ont été rencontrés. Par ailleurs, les insectes ravageurs et les ennemis naturels ont été rencontrés principalement entre les stades végétatifs et de remplissage des grains de mil. Par rapport aux foreurs de tiges et la mineuse *H. albipunctella*, leur impact sur le mil ainsi que le niveau de leur parasitisme naturel ont été étudiés au cours des saisons culturales de 2013 et 2014. Généralement, ces insectes ont présenté une distribution spatiale principalement agrégative dans les parcelles. Pour les foreurs de tiges, l'incidence, la densité et le parasitisme des larves ont été variables selon les saisons et relativement faibles. Les principales espèces responsables des dégâts étaient *Sesamia calamistis* (87% - 99%), *Coniesta ignefusalis* (12%), *Eldana saccharina* (1%) et *Busseola fusca* (1%). *S. calamistis* a été parasité par *Bracon brevicornis* (8% - 16%) alors que *C. ignefusalis* a été attaqué par *Stenobracon rufus* (3%), *Psilochalsis soudanensis* (<1%) et *Sturmiopsis parasitica* (3%). Quant à *H. albipunctella*, l'incidence a été assez élevée tandis que la densité des larves et les pertes en grain estimées ont été faibles. Le parasitisme des larves a été relativement faible et essentiellement causé par *Bracon hebetor*. Aussi, une variabilité de ces paramètres a été notée selon les saisons. En outre, les pratiques culturales telles que le travail du sol, la rotation culturale et la date de semis ont des effets variables sur l'incidence, la densité des foreurs de tiges et de la mineuse de l'épi mais également sur les pertes en grains. La régulation des foreurs de tiges et de *H. albipunctella* a été évaluée sur différentes variétés de mil pendant les hivernages de 2014 et 2015. Les variétés Thalack2 et Gawane ont enregistré moins de dégâts des foreurs de tiges tandis que la variété ISMI9507 a eu moins de dégâts dus à *H. albipunctella*. Bien qu'ayant été fortement infestées par *H. albipunctella*, la variété Thialack2 a enregistré le rendement en grain le plus élevé. Dans le cas particulier de *H. albipunctella*, le renforcement de la régulation par les lâchers augmentatifs de *B. hebetor* en milieu paysan a été effectué en fonction de la phénologie du mil et de l'émergence des adultes pendant la saison culturale de 2016. Une augmentation significative du parasitisme des larves (jusqu'à 70%) et une réduction des dégâts ont été notés lorsque les lâchers de *B. hebetor* étaient effectués 45 jours après les premières vols de *H. albipunctella* et pendant le stade de remplissage des grains de mil.

**Mots clés :** Mil, *Heliocheilus albipunctella*, foreurs de tiges, régulation biologique, *Bracon hebetor*.

## Diversity of pearl millet insect pests and their biological regulation in the Senegalese peanut basin

### Abstract

Pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), is a staple food cereal crop in Senegal where it is grown by smallholder farmers for their own consumption. However, yields remains lower (500-800kg/ha) in farmer field and attributed to many constraints including insect pests. To deal with this problem and contribute to the improvement of millet production, this thesis has been undertaken mainly to: characterize insect pests abundance and diversity in pearl millet agroecosystem; determine the distribution, incidence and damage of stem borers and the millet headminer, *H. albipunctella* as well as their natural parasitism and the effect of cultural practices; assess the biological regulation of those pests by the millet host and the augmentative release of larval parasitoids. The experimentations were conducted during 4 season (2013-2016) in the Senegalese peanut basin. The abundance and diversity of insects in pearl millet agroecosystem were studied in 2016 cropping season. Overall, 92 insect species belonging to 32 families and 7 order were identified. Different insect communities have been recorded including pests and natural enemies with variable number of individuals and species. The insect pests were most abundant and diverse with *Mylabris pallipes*, *Spodoptera exempta* and *Kraussaria angulifera* which were more frequent in pearl millet fields. For the natural enemies, about thirty species of parasitoids and predators commonly associated with insect pests were recorded. In addition, insect pests and natural enemies were recorded in millet agrosystem mainly between the vegetative and grain filling stages. For the stem borers and *H. albipunctella*, their impact on millet and natural parasitism level were investigated in 2013 and 2014 cropping season. Overall, insects showed mainly an aggregated distribution pattern in the field. Stem borers incidence, density and parasitism of larvae were variable according to seasons and lower. Stem borers species recovered from pearl millet stalks were *Sesamia calamistis* (87%-99%), *Coniesta ignefusalis* (12%), *Eldana saccharina* (1%) and *Busseola fusca* (1%). *S. calamistis* were parasitized by *Bracon brevicornis* (8% - 16%) while the parasitism of *C. ignefusalis* were due to *Stenobracon rufus* (3%), *Psilochalsis soudanensis* (<1%) and *Sturmiopsis parasitica* (3%). As for *H. albipunctella*, the incidence were high enough compared to the density of larvae and estimated grain losses. The larval parasitism were also relatively low and due to *Bracon hebetor*. Also, for this insect, evaluated parameters were variable according to seasons. Besides, cultural practices such as soil management, rotation and time of sowing showed variable effects on the incidence, densities of larvae and estimated grain losses. The regulation of stem borers and *H. albipunctella* by the cultivated pearl millet were evaluated in different varieties during 2014 and 2015 raining seasons. The varieties Thalack2 and Gawane recorded less stem borers damages while the lower *H. albipunctella* damages has been recorded from ISMI9507. Despite the high damages of *H. albipunctella* on Thialack2, the variety recorded a higher grain yield. The regulation of *H. albipunctella* by the augmentative release of *B. hebetor* in farmer field has been done according to the millet phenology and the first flight of the pest in 2016 cropping season. An increase in parasitism up to 70% and a reduction in damages were recorded after release 45 days after the first flight of *H. albipunctella* adults and during the filling stage of millet

**Keywords:** Pearl millet, *Heliocheilus albipunctella*, stem borers, biological regulation, *Bracon hebetor*

**Spécialité:** Entomologie

ISRA/CNRA, BP 53, Bambey, Sénégal. Tel: +221 33 943 63 48. Email: cnrabambey@isra.sn.