



FEED THE FUTURE

The U.S. Government's Global Hunger & Food Security Initiative

La chenille légionnaire d'automne en Afrique:

UN GUIDE POUR UNE LUTTE INTEGREE CONTRE LE RAVAGEUR

Première édition



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



CIMMYT^{MR}

International Maize and Wheat Improvement Center



RESEARCH
PROGRAM ON
Maize

CGIAR

La chenille légionnaire d'automne en Afrique:

**UN GUIDE POUR UNE LUTTE INTEGREE CONTRE
LE RAVAGEUR**

Première édition

Editeurs

B.M. Prasanna¹ | Joseph E. Huesing²
Regina Eddy² | Virginia M. Peschke³



USAID
FROM THE AMERICAN PEOPLE



CIMMYT^{MR}
International Maize and Wheat Improvement Center



**RESEARCH
PROGRAM ON
Maize**

En collaboration avec les partenaires internationaux et
nationaux en recherche et en développement

Feed the Future est une initiative américaine pour lutter contre la faim et la pauvreté dans le monde. Sous la coordination de l'USAID en s'appuyant sur le soutien et l'expertise de multiples agences gouvernementales et départementales des États-Unis, Feed the Future regroupe des partenaires pour aider certains des pays les plus pauvres du monde à renforcer le pouvoir de l'agriculture et de l'entrepreneuriat pour relancer leur économie et créer de nouvelles opportunités. Pour plus d'informations, visitez le site web www.feedthefuture.gov.

United States Agency for International Development (USAID) œuvre pour mettre fin à l'extrême pauvreté dans le monde et permettre aux sociétés résilientes et démocratiques de réaliser leur potentiel. L'USAID investit dans les idées qui contribuent à améliorer la vie de millions d'hommes, de femmes et d'enfants en investissant dans la productivité agricole afin que les pays puissent nourrir leurs populations ; luttant contre la mortalité maternelle et infantile et des maladies mortelles comme le VIH, le paludisme et la tuberculose ; fournissant une aide capitale à la suite des catastrophes ; promouvant la démocratie, les droits de l'homme et la bonne gouvernance dans le monde entier ; favorisant le développement du secteur privé et la croissance économique durable ; aidant les communautés pour qu'elles s'adaptent à un environnement en évolution ; revalorisant le rôle des femmes et des filles dans toute nos initiatives. Pour plus d'informations, visitez le site web www.usaid.gov.

CIMMYT – International Maize and Wheat Improvement Center – est le leader mondial de la recherche sur le maïs, le blé et leurs systèmes de production agricoles et est financé par des fonds publics. Basé près de Mexico City, CIMMYT travaille avec des centaines de partenaires dans les pays en développement pour augmenter durablement la productivité des systèmes de culture du maïs et du blé, améliorant ainsi la sécurité alimentaire mondiale et réduisant la pauvreté. En tant que membre du CGIAR, CIMMYT dirige les programmes CGIAR de recherche sur le maïs et le blé et la Plateforme « Excellence in Breeding ». Le Centre reçoit le soutien des gouvernements nationaux, des fondations, des banques de développement et d'autres agences privées et publiques. Pour plus d'informations, visitez le site web www.cimmyt.org.

Le programme CGIAR de recherche sur le maïs (MAIZE) est une collaboration internationale dirigée par le centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT) et l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), qui vise à mobiliser des ressources mondiales pour la Recherche et le développement (R&D) sur le maïs afin d'obtenir plus d'impact sur les systèmes agricoles à base de maïs en Afrique, en Asie du Sud et en Amérique latine. La stratégie de « MAIZE » s'appuie sur les connaissances et expériences acquises pendant des décennies de partenariats importants avec des partenaires en recherche et en développement nationaux et internationaux, y compris des institutions publiques et privées, et des communautés agricoles. Pour plus d'informations, visitez le site www.maize.org.

© 2018. **USAID et CIMMYT**. Tous droits réservés. Les désignations employées dans cette publication n'impliquent aucunement l'expression d'une quelconque opinion de la part de l'USAID ou de CIMMYT ou des organisations contributives concernant le statut juridique d'un pays, d'un territoire, d'une ville ou d'une région, ou de leurs autorités, ou concernant la délimitation de leurs frontières ou limites. L'USAID et CIMMYT encouragent une utilisation appropriée de ce document. Il est recommandé de le citer correctement.

Citation correcte: B.M. Prasanna, Joseph E. Huesing, Regina Eddy, Virginia M. Peschke (eds). 2018. La chenille légionnaire d'automne en Afrique: Un guide pour la lutte intégrée contre le ravageur, Première édition. Mexico, CDMX: CIMMYT.

Avertissement: Les opinions exprimées dans les différents chapitres de cette publication sont celles des auteurs, et ne représentent pas nécessairement les positions officielles de l'USAID, de CIMMYT, ou d'autres organisations qui emploient les auteurs.

Janvier 2018 ; Première Édition

Préface

Le monde a connu des progrès significatifs dans la lutte contre la faim, la malnutrition et l'extrême pauvreté bien qu'il reste encore beaucoup à faire. En même temps, l'émergence et la propagation rapide de la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*) en Afrique menace sérieusement la sécurité alimentaire et financière de millions de petits producteurs agricoles. Sur la base de ce que nous savons au sujet du comportement du ravageur dans les Amériques et des premières expériences en Afrique, les engagements communs en matière de réduction de la pauvreté et de la faim – tels qu'exprimés par les Objectifs de développement durable, la Déclaration de Malabo de l'Union africaine et le G7 – peuvent être difficiles à atteindre sans actions concertées et intensives à tous les niveaux. Peu de temps après son introduction en Afrique, la présence de la chenille légionnaire d'automne a été confirmée dans plus de 30 pays africains et elle risque de devenir endémique dans beaucoup de pays. Sa principale préférence pour le maïs, une nourriture de base pour plus de 300 millions de familles de petits producteurs africains, menace la sécurité alimentaire, la nutrition et les moyens de subsistance.

Vu l'immensité du défi, une réponse efficace nécessite une action coordonnée de la plus large communauté possible – comprenant les gouvernements africains, les institutions internationales et nationales de recherche, les bailleurs de fonds, le secteur privé et la société civile. L'une des bases importantes de cette action doit être la connaissance du comportement de la chenille légionnaire d'automne et les pratiques de gestion qui peuvent aider les petits producteurs agricoles à lutter efficacement contre ce dernier sans nuire à la santé humaine et animale et à l'environnement. À cet effet, nous avons convoqué des experts d'Afrique et du monde entier à Entebbe (Ouganda) (du 16 au 17 septembre 2017) afin d'examiner et d'identifier les options de gestion disponibles pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique dans le cadre d'une Lutte intégrée.

Cette publication, intitulée *La Chenille légionnaire d'automne en Afrique: un guide pour une lutte intégrée contre le ravageur*, est le résultat des contributions de douzaines d'institutions et de personnes auxquelles nous exprimons notre profonde reconnaissance. Cette communauté de savoir est composée d'experts et de praticiens issus des institutions internationales et nationales de recherche et de développement possédant une vaste expérience dans les domaines de la biologie et l'identification du ravageur ; le suivi et la surveillance ; la lutte biologique ; la résistance variétales ; la gestion des risques liés à l'utilisation des pesticides ; l'agronomie et la gestion des agro-paysages ; et les stratégies de lutte intégrée. Afin de s'attaquer à la dispersion rapide de la chenille légionnaire d'automne en Afrique, nous avons travaillé de manière intensive pour examiner rapidement et mettre en évidence les pratiques de lutte scientifiquement éprouvées susceptibles d'être pertinentes pour les producteurs africains, surtout les petits producteurs agricoles. Nous avons l'intention de réviser et de publier les éditions subséquentes de ce Guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne, en mettant à jour les connaissances scientifiques, les pratiques de lutte, les protocoles et les résultats de recherche, étant donné que davantage de preuves concernant l'efficacité des diverses options de lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique émergent.

Notre approche sur l'élaboration de cette publication est guidée par les Principes de Rome mis sur pied par les dirigeants lors du Sommet mondial sur la sécurité alimentaire de 2009 pour guider une action urgente visant à éradiquer la faim. En particulier, nous cherchons à travailler en partenariat pour :

- ◆ S'assurer que les preuves et les connaissances scientifiques guident les recommandations sur les pratiques et les politiques de lutte contre la chenille légionnaire d'automne.
- ◆ Favoriser la coordination stratégique afin d'harmoniser les connaissances, les expériences et les ressources de divers partenaires, d'éviter la duplication des efforts et d'identifier les lacunes en matière de mise en œuvre.
- ◆ Soutenir les engagements et l'appropriation des approches au niveau national en vue d'assurer une assistance adaptée aux besoins des différents pays en s'appuyant sur les consultations avec toutes les parties prenantes.
- ◆ S'engager à renforcer les capacités, en mettant l'accent sur les actions intégrées visant les politiques, les institutions et les personnes, en mettant particulièrement l'accent sur les petits producteurs et productrices.

Champ d'application de ce guide sur la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne

Ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est conçu pour être utilisé par les professionnels des organisations de protection des plantes, les agences de vulgarisation, les instituts de recherche et les gouvernements dont la préoccupation principale est les petits producteurs et les systèmes semenciers qui les soutiennent. Ce Guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est destiné à constituer une base importante pour l'émergence de

protocoles de lutte harmonisés contre la chenille légionnaire d'automne et qui sera continuellement inspiré de la recherche. Le guide devrait également servir de base à une série de diffusions en cascade de documents de connaissances techniques, et des communications sur le changement social et comportemental qui cibleront spécifiquement les besoins des petits exploitants agricoles d'Afrique.

La demande pour ce Guide sur la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est élevée. Cette première édition vise donc à fournir aux praticiens la base d'une lutte intégrée pour lutter efficacement contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique. Cela inclut notamment des chapitres sur la biologie de la chenille légionnaire d'automne et sur la lutte intégrée, l'amélioration génétique des plantes hôtes, la lutte biologique et la gestion des agrosystèmes à l'échelle paysage. Il est important de noter que le guide contient des protocoles pour le Suivi et la Détection de la chenille légionnaire d'automne dans les champs de maïs afin d'évaluer le niveau de dégâts causés par ce dernier et suggérer quand des interventions sont justifiées. Parce que l'intervention technique primaire, du moins à l'immédiat, est probablement l'utilisation des pesticides de synthèse, un chapitre est consacré à l'Évaluation des risques et dangers liés aux pesticides et de leur Compatibilité avec la lutte intégrée.

Nous reconnaissons que certains sujets importants sont encore en cours d'élaboration et pourront être fournis par d'autres canaux à court terme. Par exemple, nous ne formulons pas de recommandations particulières sur les pesticides. L'utilisation d'un pesticide particulier est réglementée au niveau national et varie donc selon la juridiction. Les recommandations nationales et les indications sur l'emballage du produit doivent être suivies lors de l'utilisation des pesticides. Nous fournissons toutefois des informations génériques sur les types de pesticides chimiques qui devraient être évités, sur ce qui serait écologiquement viable, et comment mieux évaluer les risques et dangers liés à l'utilisation des pesticides. De plus, nous n'y avons pas inclus d'informations sur l'application des pesticides puisque, dans de nombreux pays, la formation des épandeurs de pesticides peut être une activité réglementée par le gouvernement. Cependant, notre objectif pour la seconde édition du Guide sur la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne sera de fournir un aperçu général sur cette information. En attendant, nous proposons les conseils de « CropLife International », qui pourraient s'avérer utiles.

Les lecteurs du Guide sur la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne sont encouragés à identifier et à combiner les options appropriées de chacun des chapitres, en les appliquant ou en les adaptant au besoin à leur contexte local, afin de mettre au point des stratégies de lutte intégrée efficaces et locales contre la chenille légionnaire d'automne. Bien que certains chapitres dans ce Guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne (par exemple Chapitre 2 sur le suivi et la détection de la chenille légionnaire d'automne) contiennent des directives utiles, d'autres par contre (par exemple le Chapitre 4 sur la résistance variétale ; le Chapitre 5 sur la lutte biologique et les pesticides bio-rationaux) visent principalement le domaine de la recherche, fournissant ainsi des outils et des protocoles pertinents pour identifier et développer des technologies de lutte appropriées.

Le Guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est destiné à être mis à jour régulièrement. Bien que les informations compilées dans la première édition fournissent une base initiale pour la prise de décisions pratiques et la planification stratégique, les éditions futures refléteront l'évolution rapide de l'expérience africaine sur la chenille légionnaire d'automne, et permettront d'élargir et d'affiner les approches locales de lutte intégrée à la lumière des nouvelles connaissances et de nouveaux outils.

Remerciements

Cette publication, intitulée *La Chenille légionnaire d'automne en Afrique: un guide pour une lutte intégrée contre le ravageur*, est conçue comme un guide technique pour une lutte intégrée complète et approuvée par les experts et qui peut servir comme un outil de décision actualisé pour une lutte durable contre le ravageur, en particulier dans les systèmes de culture à base du maïs.

L'élaboration d'un tel manuel a été identifiée comme l'une des interventions prioritaires du plan d'action issu de l'Atelier de consultation des intervenants sur la Chenille Légionnaire d'Automne, organisé conjointement du 27 au 28 avril 2017 à Nairobi au Kenya par CIMMYT, l'Alliance pour la révolution verte en Afrique (AGRA) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

En tant que principal partenaire d'exécution, CIMMYT salue chaleureusement l'appui financier reçu aussi bien de la part de l'U.S. Agency for International Development (l'Agence des États-Unis pour le développement international - USAID) », dans le cadre de l'initiative « Feed the future », que du bureau USAID de l'Office des États-Unis pour les secours d'urgence à l'étranger qui ont rendu cette publication possible.

Ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne a été le résultat des contributions de plusieurs institutions et personnes. La "semence" de cette publication a été "plantée" d'abord lors d'un atelier très productif sur « L'élaboration d'un manuel de terrain pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne pour Afrique » organisé du 16 au 17 septembre 2017 à Entebbe, en Ouganda (Annexe 1). L'atelier, conjointement organisé par l'USAID et CIMMYT en partenariat avec la FAO, comprenait 60 experts venus des organismes nationaux et internationaux de recherche et de développement ci-après classés par ordre alphabétique: l'Alliance pour la révolution verte en Afrique (AGRA) ; Bayer ; le Conseil phytosanitaire interafricain de l'Union africaine (CPI-UA) ; Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI) ; International Maize and Wheat Improvement Center(CIMMYT) ; Crop Biosciences Ltd ; Desert Locust Control Organization-East Africa(DLCO-EA), Éthiopie ; Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) ; la FAO ; Famine Early Warning Systems Network(FEWS NET) ; International Center for Insect Physiology and Ecology (ICIPE) ; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) ; l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) ; l'Institut Julius Kuhn, Allemagne ; Kenya Agriculture and Livestock Research Organization(KALRO), Kenya ; l'Institut Leibniz, Allemagne ; le Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêches du gouvernement de l'Ouganda ; National Agricultural Research Organization (NARO), Ouganda ; l'Université du North-West, Afrique du Sud ; Ghana ; Service ghanéen de la protection des végétaux (NPPO), Malawi ; Service Malawien de la protection des végétaux (NPPO), the Netherlands ; National Plant Protection Organization (NPPO) ; Nigeria, le service nigérian de la protection des végétaux (NPPO), le Secours catholique (CRS) ; Syngenta ; l'Université d'État de l'Oregon, États-Unis ; l'Université de Floride, États-Unis ; l'Université de Lomé, Togo ; l'Université du Zimbabwe, Zimbabwe ; United States Department of Agriculture (USDA)-Agricultural Research Service (ARS) ; Virginia Tech, États-Unis ; Zambia Agricultural Research Institute (ZARI), Zambie.

Nous tenons à saluer tout particulièrement l'appui reçu de l'Agence allemande de coopération internationale (GIZ) pour le parrainage des participants de l'Institut Leibniz, l'Institut Julius Kuhn, et le Service néerlandais de la protection des végétaux (NPPO), pour l'atelier d'Entebbe.

Pendant l'élaboration de ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne, les auteurs ont tenu compte des enseignements pertinents tirés de la lutte contre la chenille légionnaire d'automne dans les Amériques, reconnaissant d'une part les différences inhérentes aux contextes et paysages agricoles américains et africains, ainsi que les points communs possibles lorsqu'il s'agit d'interventions préventives et curatives contre les ravageurs transfrontaliers, notamment la surveillance, la détection, la prévision et le contrôle d'autre part.

Le contenu des divers chapitres de cette publication a été affiné par le biais d'apports collectifs et d'échanges avec les participants durant deux ateliers régionaux de formation et de sensibilisation à la lutte contre la chenille légionnaire d'automne organisés du 30 octobre au 1er novembre 2017 à Harare, au Zimbabwe (Annexe 2), et du 13 au 15 novembre 2017 à Addis Abeba, en Éthiopie (Annexe 3). Les experts dans les domaines respectifs ont aussi examiné de manière critique le contenu de chacun des chapitres.

Nous remercions sincèrement Tracy Powell pour ses corrections précieuses et opportunes, ainsi que l'équipe de communication institutionnelle de CIMMYT, en particulier Gerardo Mejía Enciso, Clyde Beaver, et Geneviève Renard, pour leur soutien dans la mise en forme et la conception graphique de cette publication.

Liste des acronymes et abréviations

CLA	Chenille légionnaire africaine
AC	Agriculture de conservation
AGRA	Alliance pour une révolution verte en Afrique
ARC-RSA	Agricultural Research Council- République sud-africaine
ASS	Afrique subsaharienne
BSA	Bureau de la sécurité alimentaire
Bt	<i>Bacillus thuringiensis</i>
CGIAR	Consultative Group for International Agricultural Research
CABI	Centre for Agriculture and Biosciences International
CGB	Centre for Biodiversity Genomics
CIMMYT	International Maize and Wheat Improvement Center
CIP	Corps d'inclusions polyédriques
cm	centimètre
CML	CIMMYT Maize Line
CNFA	Cultiver de nouvelles frontières dans l'agriculture
CPI-UA	Conseil phytosanitaire interafricain de l'Union africaine
CRS	Secours catholique
Cry	Gène de protéine cristalline
DCA	Dan Church Aid
DLCO-EA	Organisation pour la lutte contre le criquet pèlerin en Afrique de l'Est
DR & SS	Département de la recherche et des services spécialisés
ECC	Essais en champ confiné
EIAR	Institut éthiopien de recherche agricole
ELISA	Épreuves d'immuno-absorption enzymatique
Embrapa	Entreprise brésilienne de recherche agricole
EPF	Champignons entomopathogènes
EPI	Équipements de protection individuelle
EPN	Nématodes entomopathogènes
E.U.	États-Unis
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FAW	Chenille légionnaire d'automne
FEWS NET	Réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine
FtF	Nourrir l'avenir
GCRAI	Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale
GEEL	Programme croissance, entreprise, emploi et moyens de subsistance
GEM	Amélioration du matériel génétique du maïs
GHS	Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques
GIZ	Agence allemande de coopération internationale pour le développement
GM	Génétiquement modifié
GRI	Gestion de la résistance des insectes
HPR	Résistance des plantes-hôtes
HR	Humidité relative
QD	Quotient de danger
ICIPE	Centre international de physiologie et d'écologie des insectes
IFAS	Institut de l'alimentation et des sciences agricoles (Université de Floride)
IITA	Institut international d'agriculture tropicale
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IPM	Lutte intégrée contre les ravageurs

IPPC	Centre de protection intégrée des végétaux
ISABU	Institut des sciences agronomiques du Burundi
ISRA	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
JMPM	Réunion conjointe sur la gestion des pesticides
KALRO	Organisation de recherche sur l'agriculture et l'élevage du Kenya
KAVES	Chaîne de valeur agricole des entreprises du Kenya
KEPHIS	Service d'inspection phytosanitaire du Kenya
km	kilomètre
L	litre
m	minute
mm	millimètre
MIRT	Résistance multiple aux insectes tropicaux
MoA	ministère de l'Agriculture
MOA	Mode d'action
NARO	Organisation nationale de recherche agricole
NPE	Niveau de préjudice économique
NPPO	Service national de la protection des végétaux
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONG	Organisation non gouvernementale
OP	Organophosphoré
PBAC	Plans en blocs aléatoires complets
PRM	Gestion des risques liés à l'utilisation des pesticides
PTD	Pesticides très dangereux
PVC	Chlorure de polyvinyle
RAD	Réseau agriculture durable
RCBD	Bloc complet randomisés
RCI	Régulateur de croissance des insectes
S	seconde
SAN	Réseau d'Agriculture Durable
SEI	Seuil économique d'intervention
SfGV	<i>Spodoptera frugiperda Granulovirus</i>
SfMNPV	<i>Spodoptera frugiperda Multiple Nucleopolyhedrovirus</i>
SpexNPV	<i>Spodoptera exempta Nucleopolyhedrovirus</i>
spp.	espèces
SMQ	Système de management de la qualité
SRA	Service de recherche agricole
USAID	Agence des États-Unis pour le développement international
USDA	Département de Recherche Agricole des États-Unis
USDA-ARS	Service de recherche agricole du département de l'Agriculture des États-Unis
UV	Rayons ultraviolets
VE	phase végétative précoce
VO	Vapeur organique
VPL	Variétés à pollinisation libre
VT	phase de floraison végétative
WEMA	Water effcience Maize for Africa
WHH	Welthungerhilfe
ZARI	Institut Zambien de recherche agricole

Table des matières

Chapitre 01: Introduction à la lutte intégrée contre la chenille

légionnaire d'automne	1
1. Introduction	2
1.1. Introduction et propagation/dispersion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique subsaharienne (ASS)	2
1.2. Impacts émergents à travers l'Afrique	2
1.3. Actuelle réponse africaine face à la chenille légionnaire d'automne	3
2. Description et cycle de vie de la chenille légionnaire d'automne	4
2.1. Le stade de l'œuf	4
2.2. Le stade larvaire	4
2.3. Le stade chrysalide	4
2.4. Le stade adulte	5
2.5. La gamme des plantes hôtes	6
2.6. Haplotypes de la chenille légionnaire d'automne	6
3. Un cadre de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique	6
3.1. Principes de la lutte intégrée contre le ravageur	6
3.2. Appliquer la lutte intégrée dans le cadre de la chenille légionnaire d'automne en Afrique	9

Chapitre 02: Suivi, surveillance, et détection de la chenille

légionnaire d'automne.	11
1. Introduction	12
1.1. Définitions	12
1.2. Moyens de transfert aux petits producteurs agricoles	13
1.3. Importance du suivi, de la surveillance et de la détection dans le contexte africain	13
2. Suivi de la chenille légionnaire d'automne	14
2.1. Sélection des pièges	14
2.2. Emplacement et configuration des pièges	14
2.3. Suivi des pièges	15
2.4. Collecte des données	16
2.5. Partage et utilisation des données de suivi	16
3. Détection de la chenille légionnaire d'automne dans les champs	17
3.1. Identification des stades de développement du maïs	17
3.2. Protocoles de détection	19
4. Seuils d'action et recommandations	25
4.1. Prendre une décision de traitement sans danger/ de non traitement - le processus de « répétition en quatre étapes »	26
4.2. Gestion de la résistance aux insecticides (IRM)	27
4.3. Objectifs éducatifs	27

Chapitre 03: Gestion des risques et dangers liés aux pesticides et leur compatibilité avec la lutte intégrée

compatibilité avec la lutte intégrée	29
1. Introduction	30
2. Barrières et opportunités associées aux pesticides et à la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne	30
2.1. Obstacles à la mise en œuvre de la lutte intégrée contre le ravageur et à la gestion efficace des pesticides	31
2.2. Lignes directrices accessibles et pratiques de la lutte intégrée contre le ravageur	32
3. Développement de résumés de données sur les pesticides / lignes directrices et gestion des risques	34
3.1. Classement des pesticides en fonction de leur compatibilité avec la lutte intégrée	34
3.2. Classification des risques et des dangers liés aux pesticides actuellement utilisés contre la chenille légionnaire d'automne, et propositions des mesures d'atténuation des risques	37
3.3. Communication sur les risques liés aux pesticides	42
4. Conclusions	43

Table des matières (suite)

Chapitre 04: Résistances variétales à la chenille légionnaire d'automne	45
1. Introduction	46
2. Sources de variation génétique pour la résistance variétale à la chenille légionnaire d'automne	46
2.1 Variation génétique naturelle pour la résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le maïs	47
2.2. Transgénique résistant à la chenille légionnaire d'automne dans le maïs	49
3. Protocoles pour l'amélioration de la résistance génétique à la chenille légionnaire d'automne	51
3.1. Protocole pour l'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne	51
3.2. Protocole pour la procédure de sélection du germoplasme du maïs sous infestation de la chenille légionnaire d'automne	57
Chapitre 05: Lutte biologique et Pesticides bio-rationnels pour la gestion de la chenille légionnaire d'automne	63
1. Introduction	64
1.1. Quelles sont les options biologiques et bio-rationnelles de lutte contre le ravageur?	64
2. La lutte biologique basée sur les stratégies de la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne	65
2.1. Avantages de l'utilisation de la lutte biologique contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique	65
2.2. Lâcher inondatif d'un agent de contrôle biologique contre la chenille légionnaire d'automne	66
2.3. Importance d'autres insectes bénéfiques dans la lutte naturelle de la chenille légionnaire d'automne	66
3. Comment reconnaître les ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne	67
3.1. Insectes	67
3.2. Les entomopathogènes	73
3.3. Pesticides botaniques	76
4. Protocole de suivi des agents de lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne	77
4.1 Les parasitoïdes	77
4.2 Les prédateurs	77
4.3. Les entomopathogènes	78
5. Procédures d'élevage des ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne au laboratoire	78
5.1. Production et utilisation d'un parasitoïde des œufs, <i>Trichogramma</i>	27
5.2. Production du parasitoïde des œufs <i>Telenomus remus</i>	78
5.3. Production de <i>Chelonus</i> spp.	83
5.4. Production de <i>Campoletis flavicincta</i>	84
6. Actions complémentaires à la lutte biologique	84
6.1. La lutte biologique classique mise en œuvre par l'intervention du gouvernement	85
6.2. Utilisation des pièges à phéromone femelle pour le suivi et la prise de décisions	85
6.3. Sensibilisation des producteurs aux bienfaits de la lutte biologique	85
6.4. Suggestions pour la formation continue des agents de vulgarisation rurale et des producteurs	86
7. Établissement des petites usines biologiques pour l'utilisation régionale des agents de lutte biologique contre la chenille légionnaire d'automne	86
7.1. Production à petite échelle des baculovirus infectant la chenille légionnaire d'automne	86
Chapitre 06: Pratiques agronomiques peu coûteuses et méthodes de gestion paysagère pour le contrôle de la chenille légionnaire d'automne	89
1. Introduction	90
1.1. Principes de lutte agro-écologique	90
1.2. Méthodes culturales et gestion du paysage dans le contexte des petits producteurs africains	91
2. Option de lutte culturales et de gestion paysagère	92
2.1. Pratiques recommandées pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne	92
2.2. Pratiques nécessitant des preuves de recherches supplémentaires	95
RÉFÉRENCES	97
ANNEXES	107



CHAPITRE 01

Introduction à la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne

Auteurs: Joseph E. Huesing, USAID, USA ; B.M. Prasanna, CIMMYT-Kenya ; Daniel McGrath, Université d'État de l'Oregon, États-Unis ; Peter Chinwada, Université du Zimbabwe, Zimbabwe ; Paul Jepson, Université d'État de l'Oregon, États-Unis ; et John L. Capinera, Université de Floride, États-Unis.

1. Introduction

1.1. Introduction et dispersion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique subsaharienne (ASS)

Originnaire d'Amérique, la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda* (JE Smith) ; *Lepidoptera, Noctuidae*) a été signalée pour la première fois sur le continent africain en janvier 2016 (Goergen *et al.* 2016). Des études ultérieures ont révélé que le ravageur est présent dans presque toute l'Afrique sub-saharienne (ASS), où il provoque des dégâts considérables, en particulier dans les champs de maïs et dans une moindre mesure de sorgho et d'autres cultures.

Actuellement, plus de 30 pays ont identifié le ravageur sur leurs territoires, y compris les îles comme le Cap-Vert, Madagascar, São Tomé et Príncipe et les Seychelles. Les preuves actuelles suggèrent que le type de chenille légionnaire d'automne introduit en Afrique est l'haplotype originaire du sud de Floride (États-Unis) et des Caraïbes (voir la Section 2.6 du présent chapitre). Le(s) lieu(x), la (les) date(s), le mode et le nombre d'introductions ne sont pas connus à ce jour, mais l'observation anecdotique et la réponse du gène unique du maïs génétiquement modifié (maïs *Bt*) dans le Sud et l'Est de l'Afrique suggèrent qu'il est présent depuis plusieurs années. Les conditions agro écologiques généralement favorables à la chenille en Afrique suggèrent qu'elle deviendra un ravageur endémique et multi-générationnel en Afrique.

Bien que de nouveaux ravageurs des cultures se soient périodiquement introduits dans l'environnement agricole africain et présentent le même degré de risque, de nombreux facteurs caractéristiques rendent la chenille légionnaire plus dévastatrice que beaucoup d'autres:

- **La chenille légionnaire consomme de nombreuses cultures.** Elle est capable de se nourrir sur plus de 80 espèces de cultures différentes, ce qui en fait d'elle un des ravageurs des cultures les plus nuisibles. Bien qu'elle ait une préférence pour le maïs, l'aliment de base en Afrique sub-saharienne, elle peut aussi attaquer toutes les autres grandes plantes cultivées, y compris le sorgho, le riz, la canne à sucre, le chou, la betterave, l'arachide, le soja, l'oignon, le coton, l'herbe des pâturages, le mil, la tomate, et la pomme de terre.
- **La chenille légionnaire se propage rapidement sur de vastes espaces géographiques.** À l'instar d'autres papillons du genre *Spodoptera*, les papillons de la chenille légionnaire d'automne ont des comportements à la fois migratoire et de dispersion beaucoup plus localisée. Dans le comportement migratoire, les papillons peuvent migrer sur plus de 500 km (300 miles) avant la ponte. Lorsque la direction du vent est favorable, les papillons peuvent se déplacer sur de plus grandes distances: par exemple, un vol de 1600 km depuis l'État du Mississippi, au sud des États-Unis, vers le sud du Canada en 30 heures a été enregistré (Rose *et al.* 1975).
- **La chenille légionnaire d'automne peut persister tout au long de l'année.** Dans la plupart des régions d'Amérique du Nord, elle apparaît saisonnièrement et disparaît pendant la période d'hiver, mais dans une grande partie de l'Afrique, les générations de la chenille légionnaire continueront tout au long de l'année partout où les plantes hôtes sont disponibles, y compris les cultures hors saison et irriguées et là où les conditions climatiques sont favorables. Bien que les tendances en termes de persistance, de dispersion et de migration de la population en Afrique restent à déterminer, les conditions en Afrique, en particulier lorsqu'il existe un régime de précipitations bimodal, suggèrent que le ravageur peut survivre tout au long de l'année.

1.2 Impacts émergents à travers l'Afrique

En raison de sa propagation rapide et de sa capacité distinctive à causer des dommages généralisés sur plusieurs cultures, la chenille légionnaire d'automne menace sérieusement la sécurité alimentaire et nutritionnelle ainsi que la subsistance des centaines de millions de ménages agricoles en ASS – en particulier lorsqu'elle s'ajoute à d'autres facteurs d'insécurité alimentaire. En Afrique australe, par exemple, l'apparition de cette chenille légionnaire en 2016-2017 est arrivée au moment où les ménages de la région étaient encore sous le choc de la sécheresse causée par El Niño entre 2015 et 2016, qui a affecté environ 40 millions de personnes.

Les impacts économiques potentiels de la chenille légionnaire sur la productivité agricole à travers (et au-delà de) l'Afrique sont considérables:

- D'après une note d'information publiée par le Centre international pour l'agriculture et les sciences biologiques (Centre for Agriculture and Bioscience International - CABI) en septembre 2017, en l'absence de méthodes de lutte adéquates, la chenille légionnaire d'automne peut provoquer des pertes de rendement de 8,3 à 20,6 millions de tonnes par an, dans seulement 12 des pays africains producteurs de maïs. Cela représente une proportion de 21 à 53% de la production annuelle moyenne de maïs sur une période de trois ans dans ces pays. La valeur de ces pertes a été estimée entre 2,48 et 6,19 milliards de dollars américains.

- Plusieurs sociétés semencières en Afrique subsaharienne ont signalé des dégâts importants dans leurs champs de production de semences de maïs au cours de l'année écoulée, affectant potentiellement la disponibilité des semences pour les producteurs au cours des prochaines saisons de culture et la viabilité économique du secteur semencier privé émergent en Afrique.
- La chenille légionnaire d'automne pourra avoir de graves répercussions sur les échanges régionaux et internationaux. Des rapports informels indiquent qu'elle a été interceptée dans des zones de quarantaine en Afrique et en Europe, suggérant ainsi l'ampleur des problèmes internes et externes des échanges phytosanitaires en Afrique. (Cependant, il convient de noter que ce ravageur des cultures est également capable de migrer sur de longues distances en suivant la direction des vents dominants, par conséquent son introduction est aussi possible par migration naturelle.)
- L'établissement de populations de la chenille légionnaire d'automne en Afrique a de plus grandes implications pour l'agriculture mondiale, car elle augmente le risque que le ravageur migre vers l'Europe (probablement à partir de l'Afrique du Nord et l'Égypte) et l'Asie (probablement à partir des pays africains sur la côte Est, comme l'Éthiopie).

En plus des impacts de l'introduction de la chenille légionnaire d'automne sur l'économie et la sécurité alimentaire, les premières réponses au ravageur soulignent le potentiel des impacts négatifs sur la santé humaine et environnementale. En particulier, une utilisation extensive, sans distinction et non contrôlée des pesticides de synthèse est déjà signalée de façon anecdotique par plusieurs pays d'ASS pour lutter contre ce ravageur dans les fermes agricoles. Cela peut entraîner plusieurs problèmes graves:

- De graves problèmes environnementaux et de santé publique découlant de l'application initiale de produits chimiques dangereux et de l'exposition continue aux résidus de pesticides sur les produits consommés ou dans l'environnement de production.
- Des dommages causés aux populations d'ennemis naturels et de prédateurs de la chenille légionnaire et d'autres ravageurs.
- Des risques particulièrement élevés d'exposition aux pesticides des femmes et des enfants dans les champs, puisque ce sont les femmes qui gèrent principalement les exploitations agricoles en Afrique.

1.3. La réponse africaine en cours face à la chenille légionnaire d'automne

À ce jour, le développement et la mise en œuvre des efforts coordonnés et fondés pour lutter contre les chenilles légionnaires d'automne en Afrique sont confrontés à un certain nombre de défis. En particulier, la chenille légionnaire d'automne est un ravageur récemment introduit en Afrique. Par conséquent, sa reconnaissance par les communautés paysannes et une surveillance efficace aux niveaux national, régional et continental sont limitées. En plus du retard de reconnaissance des mouvements du ravageur en Afrique, ce manque de surveillance, de suivi et de capacité d'identification a retardé les efforts visant à déterminer les points clés importants non connus des populations de chenille légionnaire sur le continent ainsi que la dynamique d'apparition et de propagation du ravageur. Les leçons tirées de la chenille légionnaire d'automne, un ravageur invasif, devraient être rapidement identifiées parce qu'elles sont importantes pour la surveillance et l'interception des futurs ravageurs invasifs.

Au-delà des défis liés à la reconnaissance et à la caractérisation de la présence de la chenille légionnaire d'automne en Afrique, le manque de stratégies validées pour une lutte efficace dans le contexte africain pose également des problèmes. Les approches fondées visant à la prévenir et à l'éviter sont actuellement limitées, et les efforts pour supprimer le ravageur sont essentiellement focalisés sur l'utilisation des pesticides de synthèse - parfois de manière non contrôlée, avec un risque élevé de causer de dommages à la santé humaine, animale et environnementale. En outre, les processus d'éducation, de recherche et de réglementation doivent encore être intensifiés et efficacement coordonnés à travers le continent, de manière à diffuser rapidement et à soutenir les bonnes pratiques émergentes pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne lorsqu'elles sont identifiées.

La chenille légionnaire va probablement demeurer un ravageur agricole important dans une grande partie de l'ASS dans un avenir prévisible. Il est donc important d'élaborer une approche efficace, coordonnée et flexible pour son contrôle sur tout le continent. Une telle approche devrait s'appuyer sur des preuves scientifiques solides, basées sur des expériences passées du contrôle du ravageur dans d'autres coins du monde et être adaptable sur une large gamme de contextes africains (en particulier pour les petits producteurs agricoles à faibles revenus). Une approche de lutte intégrée (voir la Section 3 de ce chapitre) fournit un cadre utile pour atteindre ces buts.

2. Description et cycle de vie de la chenille légionnaire d'automne¹

Le cycle de vie de la chenille légionnaire d'automne est de 30 jours environ (température quotidienne de ~28°C) pendant les mois chauds d'été, mais peut aller jusqu'à 60-90 jours au moment des températures les plus basses. Les chenilles légionnaires d'automne n'ont pas la capacité de diapause (la période de repos biologique ou période de vie ralentie) ; en conséquence, les infestations de la chenille se produisent continuellement tout au long de l'année partout où le ravageur est endémique. Dans les zones non endémiques, les chenilles légionnaires d'automne migratrices arrivent lorsque les conditions environnementales le permettent et peuvent avoir aussi peu qu'une génération avant qu'ils ne disparaissent localement. Par exemple, elle est endémique dans le sud de la Floride (latitude ~28°N) et peuplent tout l'Est des États-Unis chaque été par migration.

2.1. Le stade de l'œuf

L'œuf est en forme de dôme: la base est aplatie et l'œuf s'incurve vers le haut en un point largement arrondi au sommet. L'œuf mesure environ 0,4 mm de diamètre et 0,3 mm de hauteur. Le nombre d'œufs par masse varie considérablement, mais est souvent de 100 à 200, et une femelle peut pondre environ 1500 avec un maximum de plus de 2000. Les œufs sont parfois déposés en couches, mais la plupart des œufs sont répartis sur une seule couche attachée au feuillage (Figure 1A). La femelle dépose aussi une couche d'écailles grisâtres entre les œufs et sur la masse d'œufs (Figure 1B), donnant un aspect poilu ou moisi. La durée du stade de l'œuf n'est que de 2 à 3 jours pendant les mois chauds d'été.

2.2. Le stade larvaire

La chenille légionnaire d'automne a typiquement six stades larvaires. Les jeunes larves sont verdâtres avec une tête noire (Figure 1C), la tête devenant plus orange au deuxième stade. La largeur des capsules de tête s'étend d'environ 0,3 mm (stade 1) à 2,6 mm (stade 6), et les larves atteignent des longueurs d'environ 1 mm (stade 1) à 45 mm (stade 6) (Figure 1D). Dans le second stade, mais en particulier le troisième, la face dorsale du corps devient brunâtre, et les lignes blanches latérales commencent à se former. Du quatrième au sixième stade, la tête devient brun rougeâtre, tachetée de blanc, et le corps brunâtre porte des lignes subdorsales blanches et latérales. Des pinacles dorsaux apparaissent sur le corps ; elles sont généralement de couleur foncée et portent des épines. Le front de la larve mature peut également être marqué d'un "Y" blanc inversé (Figure 1E) et l'épiderme de la larve est rugueux ou granulaire dans la texture lorsqu'il est examiné de près. Cependant, cette larve n'a pas l'air rugueuse au toucher, tout comme la chenille des épis du maïs, *Helicoverpa zea* (Boddie), parce qu'elle manque des micro-épines trouvées chez la chenille des épis du maïs d'apparence semblable. En plus de la forme brunâtre typique de la larve de la légionnaire d'automne, la larve peut être principalement verte dorsalement. Sous la forme verte, les taches dorsales sont pâles plutôt que sombres. La meilleure caractéristique d'identification de la chenille légionnaire d'automne est un ensemble de quatre grands taches disposées en carré sur la surface supérieure du dernier segment abdominal (Figure 1E). Les larves ont tendance à se dissimuler pendant les périodes plus ensoleillées de la journée. La durée de la phase larvaire est d'environ 14 jours pendant les mois chauds d'été et de 30 jours pendant la période glaciaire. Le temps de développement moyen a été déterminé comme 3,3 ; 1,7 ; 1,5 ; 1,5 ; 2,0 et 3,7 jours pour les stades 1 à 6, respectivement, lorsque les larves ont été élevées à 25°C (Pitre & Hogg, 1983).

2.3. Le stade chrysalide

La chenille légionnaire d'automne se chrysalide normalement dans le sol à une profondeur de 2 à 8 cm. La larve construit un cocon lâche en liant les particules de sol à la soie. Le cocon est de forme ovale et mesure entre 20 à 30 mm de longueur. Si le sol est trop dur, les larves peuvent être combinées avec des débris de feuille et d'autres matériaux pour former un cocon sur la surface du sol. La chrysalide est de couleur brun rougeâtre (Figure 1F), mesurant entre 14 à 18 mm de longueur et environ 4,5 mm de largeur. La durée du stade chrysalide de la chenille légionnaire d'automne est environ 8 à 9 jours pendant l'été, mais peut atteindre 20 à 30 jours pendant les périodes de froid. Le stade chrysalide ne peut résister à des périodes prolongées de froid. Par exemple, Pitre & Hogg (1983) ont étudié la survie hivernale de ce stage en Floride, et ont trouvé 51% de survie dans le sud de la Floride, mais seulement 27,5% dans le centre de la Floride et 11,6% de survie dans le nord de la Floride. Cet intervalle est d'environ 25,1°N à 30,3°N de latitude et représente une plage de température d'hiver en janvier de 18 à 24°C (près de Miami, en Floride, aux États-Unis) à entre 4,5 et 18°C (près de Jacksonville, en Floride, aux États-Unis).

¹ Source: John L. Capinera, Université de Floride, IFAS Extension, EENY-098 (Capinera 1999)

2.4. Le stade adulte

Les papillons adultes de la chenille légionnaire d'automne ont une largeur de 32 à 40 mm. Chez le papillon mâle, les ailes antérieures sont grises et brunes, avec des taches triangulaires brunes et près du centre de l'aile (Figure 1 G). Les ailes antérieures des femelles sont moins nettement marquées, allant d'un brun grisâtre uniforme à une fine marbrure de gris et de brun. L'aile postérieure est d'un irisé blanc argenté avec une bordure sombre étroite chez les deux sexes. Les adultes sont nocturnes et sont plus actifs durant les soirées chaudes et humides. Après une période de pré-oviposition de 3 à 4 jours, la femelle dépose normalement la plupart de ses œufs pendant les 4 à 5 premiers jours de sa vie, mais une certaine ponte d'œufs a lieu jusqu'à 3 semaines. La durée de la vie adulte est estimée à environ 10 jours en moyenne, soit environ 7 à 21 jours. Luginbill (1928) a publié un compte rendu détaillé sur la biologie de la chenille légionnaire d'automne, et un résumé informatif de Sparks (1979). Ashley *et al.* (1989) a présenté une bibliographie annotée. Le sexe des phéromones a été décrit par (Sekul & Sparks 1976).



A. Masse d'œufs déposés sur la tige (à gauche) ou la feuille (à droite) d'un jeune plant de maïs.

B. Masse d'œufs (à gauche) et éclosion des larves trois jours après la ponte (à droite)



C. Larves à tête noire émergent de la masse d'œufs

D. Stades de développement larvaire (1 mm à 45 mm)

E. Marques distinctives sur les larves de moyenne à grande tailles



F. Chrysalide brun rougeâtre



G. Papillon mâle avec une tache blanche visible sur la pointe de l'aile antérieure

Figure 1. Divers stades du cycle de vie de la chenille légionnaire d'automne (Source: Ivan Cruz, Embrapa).

2.5. La gamme des plantes hôtes

La chenille légionnaire d'automne a tout une gamme de plantes hôtes, avec plus de 80 plantes enregistrées, mais préfère clairement les graminées. Les plantes les plus fréquemment attaquées sont les champs de maïs et le maïs sucré, le sorgho, l'herbe des Bermudes, les herbes graminées telles que le digitaire (*Digitaria* spp). Lorsque les larves sont très nombreuses, elles défolient les plantes préférées, acquièrent l'habitude typique de la chenille légionnaire et se dispersent en grand nombre, consommant presque toute la végétation sur leur passage. L'existence d'un grand nombre de plants hôtes reflète de telles périodes d'abondance mais ne sont pas vraiment l'indicative du comportement alimentaire et de ponte dans des conditions normales. Les plantes cultivées sont les plus fréquemment attaquées, notamment la luzerne, l'orge, l'herbe des Bermudes, le sarrasin, le coton, le trèfle, le maïs, l'avoine, le millet, l'arachide, le riz, l'ivraie, le sorgho, la betterave sucrière, l'herbe du Soudan, le soja, l'herbe de Timothy, la canne à sucre, le tabac et le blé. Parmi les cultures maraîchères, seul le maïs sucré est régulièrement endommagé, mais d'autres sont attaquées occasionnellement. D'autres cultures sont parfois attaquées comme la pomme, le raisin, l'orange, la papaye, la pêche, la fraise et plusieurs fleurs. Les mauvaises herbes connues comme hôtes comprennent l'agrostide, *Agrostis* ssp ; le digitaire, *Digitaria* spp. ; l'herbe de Johnsons, *Sorghum halepense* ; la gloire du matin, *Ipomoea* spp. ; le souchet, *Cyperus* spp. ; l'amarante, *Amaranthus* spp. ; et le cenchrus, *Cenchrus tribuloides*.

2.6 Haplotypes de la chenille légionnaire d'automne

La chenille légionnaire d'automne est constituée de deux souches adaptées à différentes plantes hôtes. Une souche ("souche de maïs") s'alimente principalement sur le maïs, le coton et le sorgho tandis que la seconde ("souche de riz") se nourrit principalement du riz et des herbes du pâturage (Dumas *et al.*, 2015a). Les deux souches sont morphologiquement identiques, mais diffèrent par les compositions de phéromones, le comportement d'accouplement et la gamme de plantes hôtes. Les accouplements entre les deux souches donnent une progéniture viable. Cependant, Dumas et ses collaborateurs ont trouvé une réduction significative du succès de l'accouplement dans les croisements des deux souches, ce qui, combiné aux différences comportementales et biochimiques, suggèrent que les deux souches sont dans un état de spéciation sympatrique (Dumas *et al.* 2015a, b ; Gouin *et al.* 2017). La manière dont ce processus évoluera dans le contexte africain fait l'objet d'une étude minutieuse (Cock *et al.* 2017, Nagoshi *et al.* 2017). Par exemple, l'analyse génétique a été utilisée pour caractériser les spécimens de la chenille légionnaire d'automne recueillis dans les champs de maïs du Togo, un pays africain (Nagoshi *et al.* 2017). Grâce au **code barre** de l'ADN, on a constaté que les spécimens étaient principalement du sous-groupe qui infeste préférentiellement le maïs et le sorgho dans l'hémisphère occidental. La configuration des haplotypes mitochondriaux était la plus semblable à celle observée dans la région des Caraïbes et de la côte Est des États-Unis, identifiant ces populations comme la source probable des infestations du Togo. Il n'a pas été trouvé dans les échantillons prélevés au Togo un marqueur génétique lié à la résistance à la toxine Cry1Fa du *Bacillus Thuringiensis* (Bt) exprimé dans le maïs transgénique et commun aux populations de chenilles légionnaires d'automne de Puerto Rico. De plus, comme indiqué ci-dessus, la performance au champ du maïs transgénique monogène Bt MON810 suggère que les allèles de résistance Bt ne sont peut-être pas présents dans la population de chenille légionnaire d'automne actuellement présente en Afrique. Ceci doit être confirmé par des recherches supplémentaires.

3. Un cadre de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique

La chenille légionnaire d'automne va probablement demeurer l'un des principaux ravageurs dans la majeure partie de l'Afrique subsaharienne dans un avenir prédictif. Il est donc nécessaire de développer une approche efficace, coordonnée et flexible pour gérer la chenille à travers le continent. Une telle approche devrait être étayée par des preuves scientifiques solides, s'appuyer sur des expériences passées sur le control du ravageur dans d'autres coins du monde et être adaptable dans une large mesure aux contextes africain (en particulier pour les petits producteurs agricoles à faibles revenus). Une approche de lutte intégrée contre le ravageur fournit un cadre utile pour atteindre ces objectifs.

3.1. Principes de la lutte intégrée contre le ravageur

Le but de la lutte intégrée est de réduire la population du ravageur à des niveaux plus bas que ceux qui causent des incidences économiques en utilisant des techniques qui minimisent les dommages causés à l'environnement, ainsi qu'à l'être humain. En raison de sa nature holistique et de la nécessité d'intégrer une diversité de techniques et de disciplines, la lutte intégrée ne doit pas être considérée comme une solution "toute faite". La lutte intégrée exige que

le producteur ou le conseiller agricole possède des connaissances importantes en agronomie et dans la lutte contre les ravageurs pour mettre en œuvre un programme efficace basé sur les conditions agricoles locales. Le processus de la lutte intégrée est adopté mondialement par des organismes internationaux tels que l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) et est généralement illustré sous forme d'un triangle (Figure 2). Une stratégie de lutte intégrée efficace pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne utilisera une diversité d'approches intégrées, y compris la résistance variétale (indigènes, conventionnelle et/ou transgénique), la lutte biologique, les pratiques culturales et les pesticides moins toxiques afin de protéger les cultures contre les dégâts économiques tout en minimisant les impacts négatifs sur les personnes, les animaux et l'environnement. La résistance variétale sera renforcée par des options de lutte biologique au fur et à mesure qu'elles sont développées et aussi bien que par des pratiques culturales dans le contexte africain. Comme dans tous les programmes de lutte intégrée, les décisions relatives à l'utilisation des pesticides se focaliseront sur le seuil économique lorsque ces options de contrôle de base ne parviennent pas à limiter les dégâts causés par les ravageurs et sur les interventions économiquement viables qui présentent le risque le plus faible pour la santé humaine et environnementale.

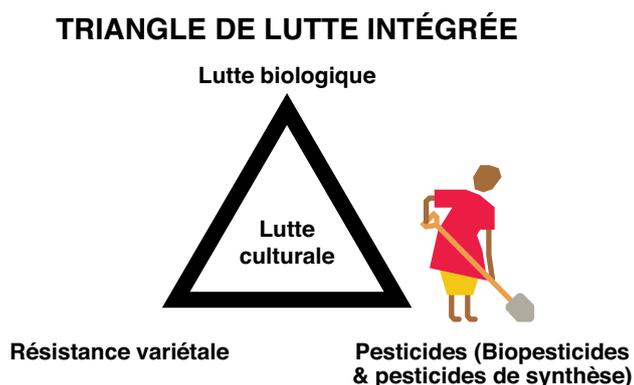


Figure 2. Triangle de lutte intégrée

Un cadre de lutte intégrée a plusieurs objectifs clés:

- **Prévenir ou éviter les infestations du ravageur** en combinant des approches respectueuses de l'environnement à l'échelle du champ, de la ferme et du paysage, telles que les pratiques culturales, la gestion des agrosystèmes à l'échelle du paysage, la résistance variétale et la lutte biologique.
- Mettre en œuvre un moyen standard **pour identifier et répondre aux** infestations potentiellement dommageables du ravageur lorsqu'elles se produisent.
- En cas d'infestation par les ravageurs, **supprimer les ravageurs** par une combinaison d'approches biologiques, physiques et, si nécessaire, chimiques - **tirer parti des interactions** entre les approches complémentaires afin de maximiser la lutte contre les ravageurs tout en minimisant les risques potentiels sur la santé humaine, animale, environnementale et sur les ennemis naturels des ravageurs.
- **Réduire au minimum la quantité et la toxicité** des pesticides chimiques utilisés pour lutter contre les ravageurs.
- Fournir **aux producteurs des choix scientifiquement validés et fondés sur de bonnes bases** sur comment atténuer de manière sûre et efficace les dommages potentiels sur leur(s) culture(s) causés par un ravageur spécifique ou une combinaison de plusieurs ravageurs.
- **Maximiser les contributions de toutes les parties prenantes du système** et **incorporer de nouveaux résultats pratiques** dès qu'ils sont disponibles pour une amélioration continue.
- **Gérer la résistance des insectes aux pesticides** en minimisant leur utilisation.

Deux concepts très importants dans la lutte intégrée sont le Seuil économique (SE) et le Niveau de Préjudice Economique (NPE). Une explication complète à ce sujet est fournie par Hunt *et al.* (2009). Les principaux points sont résumés comme suit:

- **Le seuil économique (SE)**
 - La densité d'un ravageur (ou niveau de dégât) à partir de laquelle des mesures de contrôle devraient être prises pour empêcher l'augmentation de la population du ravageur d'atteindre le NPE.
- **Le niveau de préjudice économique (NPE)**
 - Le plus petit nombre d'insectes (ou niveau de dégâts) qui causeront des pertes de rendement égales aux coûts du contrôle des insectes. Au NPE, le coût du contrôle est égal à la perte économique résultant des dommages causés par les dégâts liés à l'insecte.
 - La densité du ravageur ou la sévérité des dégâts sur les cultures auxquelles un traitement de contrôle fournira un rendement économique conséquent.

Le NPE est le seuil de rentabilité entre les pertes économiques causées par le ravageur et le coût de la lutte contre le ravageur, par exemple les coûts d'équipement, de la main d'œuvre et des pesticides (Figure 3). Puisque les conditions économiques (comme la valeur marchande des produits de base, les coûts de gestion) fluctuent, le NPE fluctuera aussi. Le calcul du NPE est le suivant:

$$\text{NPE} = C / (V \times \text{DI} \times K),$$

Où

C = Coût de la lutte contre les ravageurs,

V = Valeur marchande du produit,

DI = Perte de rendement due aux ravageurs,

K = Population du ravageur contrôlée.

Notez que si les coûts du traitement (C) sont élevés, il faut plus de ravageurs pour justifier les mesures de contrôle ; ce qui implique un NPE plus élevé. De même, si la valeur marchande (V) diminue, alors plus de ravageurs peut être tolérés se traduisant aussi par un NPE élevé. un nombre plus élevé de ravageurs peut être toléré et le NPE augmente de nouveau. Une bonne stratégie de lutte intégrée utilise une combinaison de résistance variétale, de lutte biologique et de pratiques culturales pour faire chuter les populations de ravageurs en dessous du Seuil économique (SE). Lorsque les populations du ravageur dépassent le SE, le producteur doit prendre une décision:

- Soit ne rien faire et payer le prix en termes de perte de rendement ;
- soit traiter (pulvériser) et payer les charges de produits chimiques et de main d'œuvre.

En principe, les variables de calcul du NPE (C, V, DI, K) et l'évaluation du NPE devraient être un exercice mathématique facile. Dans la pratique, le SE et le NPE sont difficiles à déterminer et sont généralement basés sur des données de recherche fondamentale pluriannuelles. Par exemple, les prix des produits de base et des pesticides sont assez faciles à déterminer, mais la perte de rendement due à un ravageur donné, au stade de développement de l'insecte, au stade de développement de la culture, et de l'agro écosystème dans lequel la plante est cultivée compliquent considérablement les choses.

De même, le SE, qui est normalement le « déclencheur » d'une procédure d'intervention nécessaire, est très difficile à estimer parce qu'il représente une prédiction de la date à laquelle la population de ravageurs va atteindre le NPE. Ceci exige une connaissance suffisante de la culture et de l'agroécosystème ainsi que la dynamique de la population du ravageur. Dans le cas d'un nouveau ravageur invasif, l'estimation de ces paramètres est très difficile. Dans le contexte des petits producteurs africains, le SE et le NPE sont encore plus difficiles à calculer parce qu'il peut arriver que les petits producteurs agricoles peuvent compter faire de leur culture de l'autoconsommation que de la vendre. Les chercheurs en sciences sociales et les anthropologues ont des techniques pour faire ces comparaisons, mais ce travail exige aussi de la recherche fondamentale.

Dans la pratique, les vraies valeurs de SE et NPE n'ont pas encore été déterminé pour la plupart des cultures. En contrepartie, les seuils nominaux appelés ici Seuils d'action, sont calculés sur la base de l'opinion et de l'expérience des experts couplés avec des évaluations précises de repérage dans les champs. Ces seuils nominaux sont utilisés dans toute la communauté de la lutte intégrée contre le ravageur et, bien qu'ils aient tendance à être traditionnels, ils servent plutôt bien pour le but. Par conséquent, compte tenu de la longue histoire de la lutte contre la chenille légionnaire d'automne dans les pays de l'Amérique, il est raisonnable d'utiliser l'opinion des experts pour formuler des seuils d'action pour cette chenille Légionnaire d'automne en Afrique à court terme.

L'efficacité d'une approche de lutte intégrée découle crucialement des interactions complémentaires entre les différentes composantes du système. Une bonne compréhension de ces interactions est importante pour une lutte durable contre la chenille légionnaire d'automne. Par exemple:

- Les pratiques culturales qui favorisent la croissance des plantes saines sont importantes parce que les plantes saines sont généralement moins vulnérables aux attaques d'insectes et de pathogènes.
- Les interventions culturales au niveau du champ et de la ferme (par exemple l'association des cultures, l'agriculture de conservation et ses composantes) améliorent en général l'activité biologique au sein du système de culture, ce qui fournit un abri aux prédateurs de petite envergure du ravageur (araignées, fourmis, coléoptères, champignons et bactéries). En retour, cela peut aider à contrôler les larves du ravageur, ce qui réduit la prolifération des insectes.
- Sensibiliser les producteurs sur la façon d'identifier la chenille légionnaire d'automne et ses dégâts dans le champ à travers le repérage, l'évaluation de la population du ravageur et de ses dégâts sur les cultures, ainsi que les décisions pertinentes à prendre sur le moment où il faut appliquer ou non un pesticide sont essentielles. Les interventions effectives ne doivent avoir lieu qu'après les opérations appropriées de repérage du ravageur dans le champ.

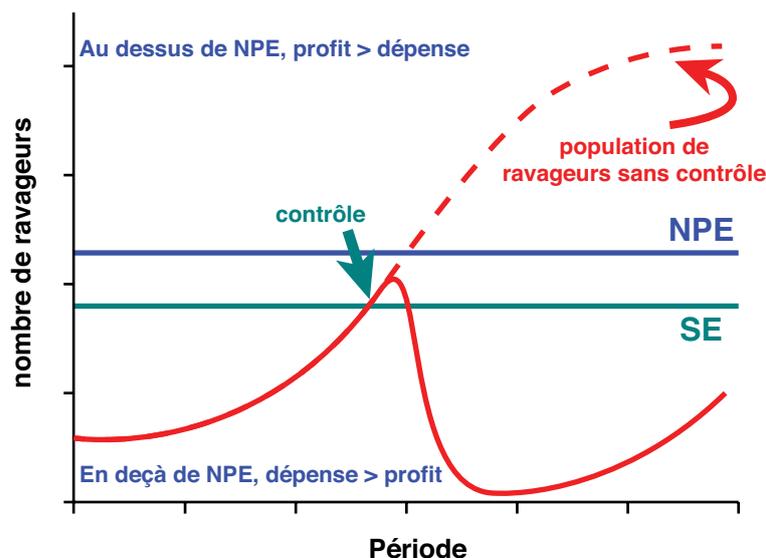


Figure 3. La relation entre le nombre de ravageurs au fil du temps et le calcul du Seuil économique (SE) et le Niveau de Préjudice Economique (NPE). Source: Barbercheck & Zaborski (2015).

- Une sélection judicieuse et une utilisation limitée de pesticides à faible toxicité et à courte durée de persistance dans l'environnement sont nécessaires.

Il faut noter qu'aucun programme spécifique de lutte intégrée ne sera efficace contre les chenilles légionnaires d'automne dans toutes les agro-écologies en Afrique. Les programmes de lutte intégrée doivent être spécifiques au contexte - identifier, adapter et combiner les approches d'une manière adaptée à l'agro-écologie, aux capacités et au contexte socio-économique d'un pays ou d'une communauté agricole donnée(e).

3.2. Appliquer la lutte intégrée dans le cadre de la chenille légionnaire d'automne en Afrique

Afin d'élucider le développement des stratégies de lutte intégrée localement adaptées en Afrique, ce guide de lutte intégrée contre les chenilles légionnaires d'automne compile les stratégies de lutte contre les chenilles légionnaires d'automne scientifiquement validées et actuellement disponibles. Sur la base de la recherche et de l'expérience du terrain des pays qui ont traité la question depuis des décennies, comme les États-Unis et le Brésil, le document présente les meilleures stratégies de lutte ayant été validées ou qui sont en cours de validation dans le contexte africain (ou, compte tenu de l'état relativement récent de l'expérience pratique sur les chenilles légionnaires d'automne en Afrique, les experts estiment que ces stratégies sont appropriées pour l'adaptation aux agro-écologies et aux systèmes de culture africains). Organisés selon les composants clés d'un système de lutte intégrée, les cinq chapitres suivants mettent l'accent sur les connaissances et les outils pratiques actuellement disponibles pour lutter contre les chenilles légionnaires d'automne en Afrique :

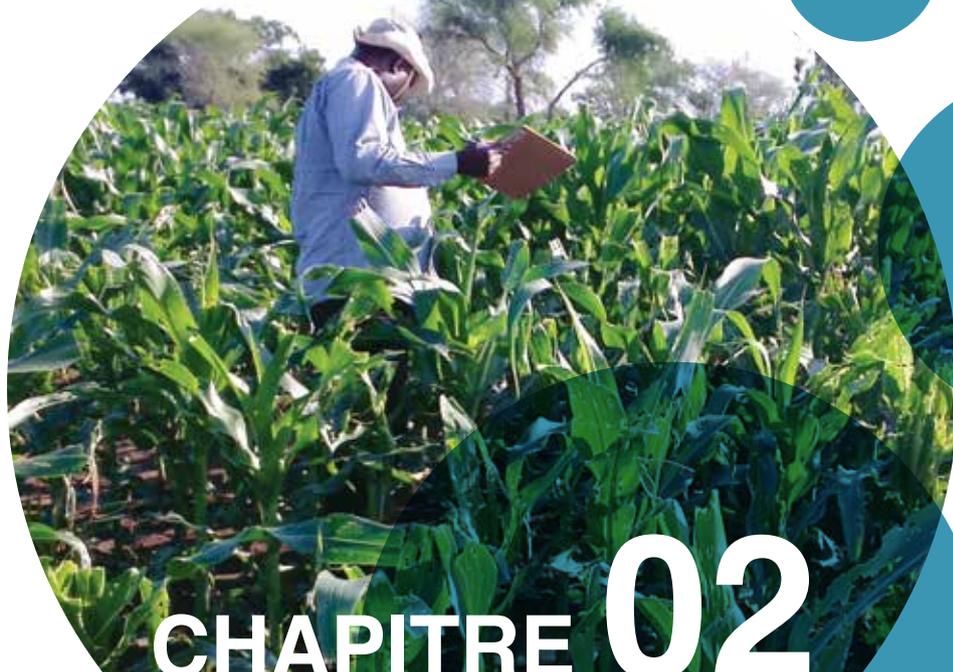
- Chapitre 2: Suivi, surveillance et détection
- Chapitre 3: Gestion des risques et dangers liés aux pesticides
- Chapitre 4: Résistances variétales
- Chapitre 5: Contrôle biologique et pesticides bio-rationaux
- Chapitre 6: Pratiques agronomiques peu coûteuses et approches de gestion du paysage

Une grande partie des données disponibles sur les méthodes de lutte contre les chenilles légionnaires d'automne en Afrique est à l'étape préliminaire. Ceci se reflète dans les chapitres, dont certains contiennent des orientations plus immédiates que d'autres ou peuvent viser des publics quelque peu différents selon l'état des connaissances disponibles. Par exemple, des directives sur le repérage (Chapitre 2) et sur la gestion des risques et des dangers

liés aux pesticides (Chapitre 3) sont disponibles pour informer les producteurs, les vulgarisateurs, les régulateurs et les autres parties prenantes sur les décisions à court terme au niveau du champ. En revanche, à partir de la publication de cette première édition, les chercheurs continuent toujours par travailler pour identifier et valider les niveaux de résistance variétale du matériel génétique végétal actuellement adapté à l'Afrique ainsi que les options de lutte biologique. Par conséquent, le Chapitre 4 (Résistances variétales) et le Chapitre 5 (Lutte biologique) offrent relativement peu de directives pratiques pour éclairer les décisions à court terme en matière de culture, de vulgarisation ou de transfert de technologie, et se focalisent plutôt sur la fourniture d'outils et de protocoles pertinents pour aider les partenaires en recherche et en développement à identifier et à mettre au point des technologies appropriées (variétés résistantes et lutte biologique).

Dans tous les cas, ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est destiné à être mis à jour régulièrement. Bien que les informations recueillies ici fournissent une base initiale pour la prise de décisions pratiques et la planification stratégique, les éditions futures refléteront l'évolution rapide de l'expérience africaine sur la chenille légionnaire d'automne, et permettront d'élargir et d'affiner les approches locales d'une lutte intégrée à la lumière des nouvelles connaissances et des nouveaux outils. Il est donc important de sensibiliser les communautés agricoles sur les stades de vie du ravageur, de repérer le ravageur (ainsi que leurs ennemis naturels), de comprendre les bonnes étapes de la lutte contre le ravageur et de mettre en œuvre des pratiques agronomiques peu coûteuses et d'autres pratiques de gestion du paysage (Chapitre 6) pour une lutte durable contre le ravageur.

Par ailleurs, il est important d'introduire, de valider et de vulgariser des interventions technologiques peu coûteuses, efficaces et respectueuses de l'environnement à court, moyen et long terme pour une lutte durable contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique, surtout en tenant compte du fait que la grande majorité des agriculteurs africains sont des petits producteurs à faibles revenus.



CHAPITRE 02

Suivi, surveillance, et détection de la chenille légionnaire d'automne

Auteurs: Daniel McGrath, Université d'État de l'Oregon, États-Unis ; Joseph E. Huesing, USAID, États-Unis ; Robert Beiriger, Gregg Nuessly, Université de Floride, États-Unis ; Tchoromi Ghislain Tapa-Yotto, IITA, Bénin ; David Hodson, CIMMYT-Éthiopie ; Emily Kimathi, ICIPE, Kenya ; Felege Elias, DLCO-EA, Éthiopie ; John Abah Obaje, NPPD, Nigéria ; Margaret Mulaa, CABI, Kenya ; Ana Paula Mendes, USAID, Brésil ; Abdel Fattah Amer Mabrouk, CPI-UA, Cameroun ; et Yene Belayneh, USAID, États-Unis.

1. Introduction

Le suivi, la surveillance et la détection sont des activités importantes et nécessaires à la réussite de la mise en œuvre d'un programme efficace de lutte intégrée. Prévoir quand un ravageur sera présent et ensuite évaluer l'incidence et la sévérité d'une infestation permettent une atténuation opportune du problème en utilisant peu de moyens et sans dangers pour protéger efficacement et économiquement les pertes de rendement tout en préservant les services écosystémiques nécessaires et en minimisant les préjudices environnementaux. Le présent chapitre fournit des informations et des contextes sur le rôle et des processus de suivi, de surveillance et de détection ainsi que leur lien avec un programme de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique. En outre, ce chapitre fournira:

- Des protocoles de suivi pour l'utilisation des pièges à phéromone.
- Des protocoles de détection dans les champs.
- Des directives pratiques pour déterminer s'il faut et quand est ce qu'il faut utiliser les options de contrôle chimique, basées sur les seuils d'action, de suivi et de détection.

Le contenu du chapitre fait ressortir les connaissances et pratiques du terrain qui seront immédiatement utiles aux petits producteurs africains et aux producteurs pionniers au niveau du village (voir Section 1.2), ainsi qu'aux professionnels de la vulgarisation qui élaborent des documents techniques pour servir ces publics. Le chapitre peut également être d'intérêt général pour les techniciens spécialisés et les décideurs dans l'élaboration, la mise en œuvre et la coordination des plus grands moyens de surveillance de la chenille légionnaire d'automne à l'échelle locale, nationale, régionale et continentale.

1.1. Définitions

Les termes utilisés pour le suivi, la surveillance et la détection ne sont pas entièrement normalisés entre les juridictions et les disciplines scientifiques. Dans certains cas, ils sont utilisés comme synonymes et dans d'autres, ils ont un sens unique. Ceci peut porter confusion. Par conséquent, dans le contexte du présent chapitre, les définitions suivantes seront considérées:

- **Le suivi** indique un effort pour suivre sérieusement la présence, le peuplement et le mouvement d'un ravageur dans une zone géographique bien déterminée. Les activités de suivi peuvent être organisées et mises en œuvre à diverses échelles, le plus souvent par les gouvernements, par le biais d'un personnel technique qualifié qui recueille systématiquement les données pour informer les décideurs et les praticiens sur la présence et la sévérité du ravageur dans une région donnée. Toutefois, des mesures plus localisées telles que les données des producteurs formés pour la détection dans leurs champs, peuvent aussi être réunies et intégrées dans des grands programmes de suivi bien établis. Enfin, le suivi a également un sens spécifique dans le contexte de la Gestion de la Résistance aux Insectes (GRI), qui renvoie à l'évaluation continue et répétée de la susceptibilité d'un insecte à une toxine particulière (par exemple à un pesticide conventionnel ou à une protéine à effet insecticide intégrée dans une culture génétiquement modifiée).
- **La surveillance** désigne la détection informelle et hasardeuse des problèmes relatifs aux ravageurs au fur et à mesure qu'ils apparaissent. En d'autres termes, cette approche ne recherche pas sérieusement un ravageur spécifique ; elle indique seulement quand un problème se produit. La surveillance est généralement effectuée par les producteurs sur le terrain et dans les champs et ne nécessite aucune formation ou approche particulière. Il ne faut pas sous-estimer l'importance de la surveillance. L'histoire montre que les producteurs sur le terrain font souvent partis des premiers à identifier les nouveaux problèmes et lorsqu'il existe un mécanisme qui pourrait à chaque temps recueillir et suivre les rapports de surveillance, les expériences collectives des milliers de producteurs peuvent fournir des informations pertinentes sur la dynamique de l'infestation du ravageur.
- **La détection** se réfère à une activité conduite sur des bases scientifiques par un individu formé, spécifiquement par un producteur formé dans un champ-école ou au niveau de l'agence de vulgarisation, qui observe la présence du ravageur dans ses propres champs. La détection permet au producteur d'évaluer précisément la pression du ravageur (par exemple l'intensité de l'infestation par la chenille légionnaire d'automne) et la performance de la culture dans le champ. La détection est spécifiquement effectué afin d'évaluer le risque économique de l'infestation du ravageur et le potentiel de l'efficacité des interventions de lutte contre le ravageur dans le contexte immédiat du champ, dans le but de ressortir des décisions pratiques de gestion des cultures au niveau du champ et de l'exploitation. Cependant, les données de détection localisée peuvent également être réunies et intégrées dans des schémas de suivi à des échelles géographiques plus larges.

1.2. Moyens de transfert aux petits exploitants agricoles

Ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne décrit une diversité de produits, de pratiques et de connaissances qui peuvent être appliquées pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique subsaharienne. Les moyens par lesquels ces approches parviennent aux petits exploitants agricoles peuvent varier considérablement entre les pays et les régions selon la disponibilité des services de vulgarisation formelle et informelle et la combinaison des acteurs du secteur public et du secteur privé présents dans un lieu donné. Le contenu de ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne est destiné à servir de ressource générale pouvant être utilisée par les agents de vulgarisation du secteur public, les particuliers du secteur privé, les partenaires d'exécution du développement et autres pour élaborer des documents de vulgarisation adaptés localement. Toutefois, en fin de compte, l'utilisateur final de ces technologies est le petit producteur agricole. Fait important, plusieurs communautés de petits producteurs agricoles à travers l'Afrique constituent généralement une sous-entité de petits exploitants innovants, mais pas toujours mieux éduqués ou mieux outillés que leurs voisins qui sont plus susceptibles d'agir comme les "pionniers" dans l'adoption des nouvelles technologies. Tout au long de ce manuel, nous faisons référence à ces petits producteurs comme des "producteurs pionniers au niveau du village". En général, les producteurs pionniers devraient être les "pionniers de l'adoption" des produits, pratiques et connaissances présentés dans le guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne. Une fois que les producteurs pionniers auront démontré la valeur de ces approches à leurs voisins, les efforts ultérieurs visant à accroître l'adoption des mesures de lutte contre la chenille légionnaire d'automne sont plus susceptibles de se propager par l'intermédiaire des communautés locales et de parvenir à une réduction significative du ravageur.

1.3. Importance du suivi, de la surveillance et de la détection dans le contexte africain

La réponse actuelle en Afrique à la chenille légionnaire d'automne est confrontée à plusieurs défis résultant des insuffisances du système de suivi, de surveillance et de détection, notamment la reconnaissance tardive de la présence répandue du ravageur sur tout le continent ainsi que l'absence d'informations sur la dynamique de la migration de la chenille légionnaire d'automne qui permettraient une prédiction efficace du lieu où l'infestation pourrait se produire. Peut-être ce qui est plus dangereux pour les producteurs en Afrique et les communautés rurales est que la propagation de la chenille légionnaire d'automne a parfois entraîné une utilisation non contrôlée de pesticides, souvent sans tenir compte de la nécessité ou de l'efficacité de la lutte chimique dans le contexte local.

Dans ce contexte africain, l'adoption de systèmes efficaces de suivi, de surveillance et de détection est une étape cruciale dans la mise en œuvre d'une stratégie efficace de lutte intégrée à n'importe quelle échelle. Un tel système est nécessaire non seulement pour donner une alerte précoce de l'infestation de la chenille légionnaire d'automne et améliorer la compréhension de la dynamique du ravageur, mais aussi aider les producteurs à déterminer quand il faut et surtout quand il ne faut pas utiliser les pesticides.

Des directives pratiques sur la façon de détecter la chenille légionnaire d'automne et à quel seuil donné, il faut utiliser des options de lutte chimique permettent une utilisation plus ciblée et plus efficace des pesticides. Une utilisation plus ciblée et plus efficace appuie davantage l'harmonisation des tactiques de lutte biologique, chimique et culturale, qui profitent à la fois aux agriculteurs formateurs locaux et aux petits producteurs agricoles de plusieurs façons:

- Économise de l'argent gaspillé sur les traitements chimiques inefficaces.
- Réduit l'exposition des êtres humains et des animaux aux champs, des résidus alimentaires et de l'environnement aux pesticides.
- Protège les ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne, qui peuvent également être tués par des pesticides.
- Préserve la qualité du sol et de l'eau.
- Gère la résistance aux insecticides, en aidant à maintenir l'efficacité des options de lutte chimique existantes au fil du temps.

Ces orientations peuvent être particulièrement importantes pour les petits producteurs agricoles en Afrique, qui dépendent largement des cultures comme le maïs pour nourrir leurs familles ou compléter le revenu des ménages qui n'ont souvent pas d'accès aux connaissances ou aux outils pour utiliser les pesticides de manière sécurisée.

2. Suivi de la chenille légionnaire d'automne

Le suivi régional de la chenille légionnaire d'automne vise à suivre activement la présence, la population et le mouvement de la chenille dans une zone géographique bien déterminée. Il est généralement conduit par un personnel technique qualifié sur les sites d'un pays ou d'une région, mais peut aussi être mené au niveau des villages et des champs par les petits exploitants agricoles et les producteurs pionniers au niveau du village.

Dans les deux cas, le suivi repose généralement sur des pièges à phéromone érigés près des champs pour piéger les papillons mâles adultes. Le nombre de chenilles légionnaires d'automne dans les pièges est compté, enregistré, et utilisé pour prendre des mesures appropriées (en général, transmettre les données aux autorités compétentes et effectuer des prospections plus poussées et ciblées aux champs pour ressortir les recommandations en matière de gestion des cultures et de prise de décision).

2.1. Sélection des pièges

Un piège à phéromone est un type de piège à insectes qui utilise des phéromones pour attirer (habituellement) les insectes mâles.

Une phéromone est un produit chimique sécrété (généralement) par la femelle d'insecte qui attire les mâles pour l'accouplement.

Les phéromones peuvent parcourir de très longues distances et sont ainsi très utiles pour surveiller la présence d'insectes. Les phéromones sexuelles et les phéromones d'agrégation sont les types de phéromones les plus couramment utilisés.

À l'heure actuelle, plusieurs types de leurres à phéromones sont évalués ainsi qu'une diversité de types de pièges. Tous ces éléments peuvent fonctionner, mais certains leurres à phéromones attirent aussi un nombre limité de papillons qui ne sont pas des chenilles légionnaires d'automne, ce qui peut causer une certaine confusion.

Sur la base des informations actuellement disponibles, les pièges suivants sont recommandés:

- Pour les petits exploitants agricoles, le piège à seau universel (voir Section 2.2.1)
- Pour un suivi régional, le piège à phéromone de type *Heliothis* (voir Section 2.2.2)

2.2. Emplacement et configuration des pièges

- Placer le piège à phéromone un mois avant le semis.
- Placer le piège dans le champ ou à côté du champ de maïs afin que le vent puisse transporter l'odeur de la phéromone au-dessus des plants.
- Accrocher le piège de manière verticale sur un long piquet (de 3 à 4 m) pour que le piège soit à environ 1,25 mètre du sol. (Voir les Sections 2.2.1 et 2.2.2 pour des instructions précises sur les différents types de piège.)
- Lorsque les pièges sont suspendus, ils devraient être positionnés de manière verticale, droite et si possible en position descendante afin d'empêcher l'eau de rentrer par les côtés.

2.2.1. Le piège à seau universel (Figure 1)

- Attaché la phéromone.
 - Placer le leurre de phéromone dans la paroi à l'intérieur du panier au-dessus du piège à seau.
 - Remplacer le leurre de phéromone toutes les quatre semaines.
 - Conserver les leurres supplémentaires dans un congélateur.
- Insérer des rubans à insecticides.
 - Dérouler le ruban à insecticide (Vapor-tape) et le placer à l'intérieur du piège pour tuer les papillons une fois qu'ils entrent dans le piège. Ne pas manipuler le ruban à insecticide à mains nues, c'est un poison. Utiliser les gants ou autres outils.



Figure 1. Piège à seau.

- Un ruban devrait durer quatre semaines, après lesquelles il faudra le remplacer.
- Ne stockez pas des rubans supplémentaires avec la nourriture, les rubans sont toxiques.
- Conservez-les dans une boîte hermétiquement fermée et rangez-les dans un endroit frais et sombre.



Figure 2. Le piège de type « Heliiothis ».

2.2.2. Le piège de type « *Heliiothis* » (Figure 2)

- Attacher la phéromone.
 - Utiliser un trombone ou un mince morceau de fil pour percer le leurre en caoutchouc. Fixer le leurre au fond du piège, en centrant la phéromone sous le trou inférieur.
 - Replacer le leurre de phéromone toutes les trois semaines.
 - Conserver les leures supplémentaires dans le congélateur.
- Vérifier la voie de sortie.
 - S'assurer que l'entrée du piège est couverte de phéromone jusqu'à l'intérieur de l'entonnoir (pièges à papillons).
 - S'assurer que les feuilles et les épis mâles ne bloquent pas l'entrée du piège à phéromone.

2.3. Suivi des pièges

- Vérifier et vider le piège chaque semaine. Pour ce faire, détacher le "piège à papillons" du corps du piège à phéromone. Tourner le piège à papillons à l'envers (Figure 2). Les chenilles légionnaires d'automne sous forme de papillons peuvent ramper sur les bords du piège.
- Pincer le thorax des papillons entre le pouce et l'index pour bloquer les muscles des ailes afin d'identifier les papillons de la chenille légionnaire d'automne.
- Il peut y avoir des papillons autres que ceux de la chenille légionnaire d'automne dans le piège. Trier et compter les papillons de la chenille légionnaire d'automne (Figure 3 et 4) (les ailes avec une tache blanche près de la partie supérieure de l'aile ; les veines marron de l'aile postérieure) et n'importe quel papillon de chenille légionnaire africaine (Figure 5) (veines marron de l'aile postérieure) séparément.
- Au fur et à mesure que les plants de maïs grandissent, déplacer le piège vers le haut pour que le fond du piège soit toujours à environ 30 cm au-dessus des plants.



Figure 3. Papillon mâle de la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*). Les flèches jaunes montrent les caractères clés.

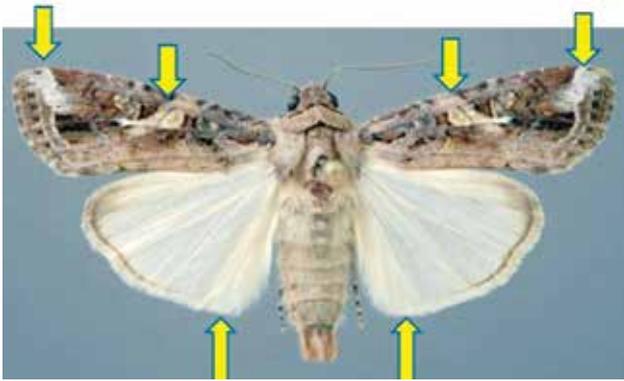


Figure 4. Papillon mâle de la chenille légionnaire d'automne (*Spodoptera frugiperda*). Les flèches jaunes montrent les caractères clés. (Source: L. Buss, Université de Floride, Bugwood.org).



Figure 5. Papillon mâle de la chenille légionnaire d'Afrique (*Spodoptera exempta* ; CLA). (Source: Georg Goergen, IITA).

2.4. La collecte des données

Les données suivantes doivent être collectées sur une fiche de détection (voir Section 5):

- Date de la présente collecte.
- Stade de croissance des plants du maïs.
- Nombre de papillons de la chenille légionnaire d'automne.
- Nombre de papillons de la chenille légionnaire d'Afrique (le cas échéant).

2.5. Partage et utilisation des données de suivi

Les tendances numériques des papillons de la chenille légionnaire d'automne provenant des régions et des pays voisins sont très pertinentes et devraient être partagées. Les chiffres des papillons de la chenille légionnaire d'automne au niveau continental sont coordonnés par un groupe de travail géré par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) composé de l'Agence des États-Unis pour le Développement International (US Agency for International Development - USAID), Centre International pour l'Amélioration du Maïs et du Blé (CIMMYT), le Centre International pour l'Agriculture et les Sciences Biologiques (CABI), le Centre International de Physiologie et d'Ecologie de l'Insecte (CIPE), l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), l'Université de Barcelone, l'Université d'État de Pennsylvanie, l'Université de Lancaster, le Service National Ougandais de Recherche Agricole (NARO) et d'autres institutions de recherche nationales africaines.

Le nombre de pièges à phéromone de papillons seul n'est pas suffisant. Ne jamais fonder une décision de traitement sur les chiffres des papillons seuls. Souvenez-vous:

- Le nombre de papillons peut rester faible (moins d'un papillon par piège par jour), même pendant une invasion massive. Il peut ne pas y avoir de papillons dans le piège en bordure du champ même si un pourcentage important de plantes est infesté par la chenille légionnaire d'automne.

- Le nombre de papillons indique la présence de la chenille légionnaire d'automne dans la zone, mais n'indique pas le niveau d'intensité de ponte. L'opération de détection est nécessaire pour déterminer l'intensité des pontes (Pourcentage de plantes infestées) (par exemple la Section 3).
- Ne pas baser les décisions de traitement sur le nombre de papillons comptés seul. Faire l'évaluation dans les champs pour déterminer la nécessité du traitement.

3. Détection de la chenille légionnaire d'automne dans les champs.

La détection est basée sur la connaissance du ravageur et de l'agroécosystème des cultures, ainsi que sur la compréhension des déclencheurs d'intervention et des outils d'atténuation.

- Effectuer une recherche dans un champ de maïs pour la détection des chenilles légionnaires d'automne n'est pas sans coût. Par exemple, la recherche dans un champ de maïs de 50 000 plants à raison de 5 secondes par plant pourrait coûter près de 70 heures de travail.
- Pour faire de la détection efficace et économique dans un champ de maïs, il faut employer des techniques d'échantillonnage.

Sur la base d'opinions d'experts en Afrique et dans le monde, des seuils d'action provisoires basés sur la phase de croissance des plants sont présentés. Au fil du temps, la communauté de la recherche élaborera des seuils économiques plus formels (voir Chapitre 1).

- Nous avons considéré les deux catégories de producteurs décrites à la Section 1.2. - les petits producteurs agricoles et les producteurs pionniers au niveau du village- et élaboré des seuils d'action distincts pour chacun de ces deux groupes (Tableau 1).
- En général, les petits producteurs agricoles et les producteurs pionniers parcourent leurs champs de la même manière. Dans le cas des petits producteurs agricoles, il faudra peut-être consacrer plus de temps pour expliquer les Seuils d'action, l'échantillonnage et l'utilisation des pesticides. En outre, des procédures d'atténuation plus traditionnelles sont recommandées pour les petits producteurs agricoles, car ils manquent souvent de formation et d'équipement de protection nécessaire pour utiliser efficacement et en toute sécurité de nombreux pesticides.
- Normalement, les décisions de traitement d'un pesticide sont fondées sur le seuil économique et le niveau de préjudice économique calculés. Nous n'avons pas de seuils économiques basés sur les estimations des pays africains, mais nous avons plus de 100 ans d'expérience sur la chenille légionnaire d'automne dans les Amériques. Dans cette situation, sur la base de l'opinion d'expert, des seuils d'action provisoires qui sont des seuils de croissance végétale devraient être utilisés.

3.1. Identification des stades de développement du maïs

Il est important pour un producteur d'avoir une compréhension globale de la phase de développement de sa culture de maïs lors de la détection, car le stade de développement informe un certain nombre de facteurs pertinents:

- La densité de la canopée dans le champ, qui, à son tour, informe le modèle de détection à utiliser pour échantillonner le champ.
- Les parties de la plante accessibles à l'insecte pour l'infestation, et la durée de la période pendant laquelle les larves de la chenille légionnaire d'automne peuvent infester la plante après la levée. Cela explique à son tour quelle partie de la plante doit être inspectée pendant la détection et quels signes d'infestation recherchés.
- L'efficacité des options de lutte chimique et la durée du délai avant récolte, qui tous deux ont des impacts sur le Seuil d'action recommandé avant que le traitement de pesticide ne soit recommandé.

L'identification correcte de la phase de développement aide à susciter la décision de traiter le champ de maïs et, si oui, comment. En général, les stades de croissance du maïs sont divisés en phase végétative (V), floraison mâle (FM), et reproductive (R) (Figure 6). Le stade V du maïs est défini comme le nombre de feuilles de maïs affichant une gaine foliaire (Figure 7) et non le nombre total de feuilles sur la plante. Par exemple, la plante de maïs présentée dans la Figure 7 est dans la phase V3, et non dans la phase V5.

Stades de développement du maïs

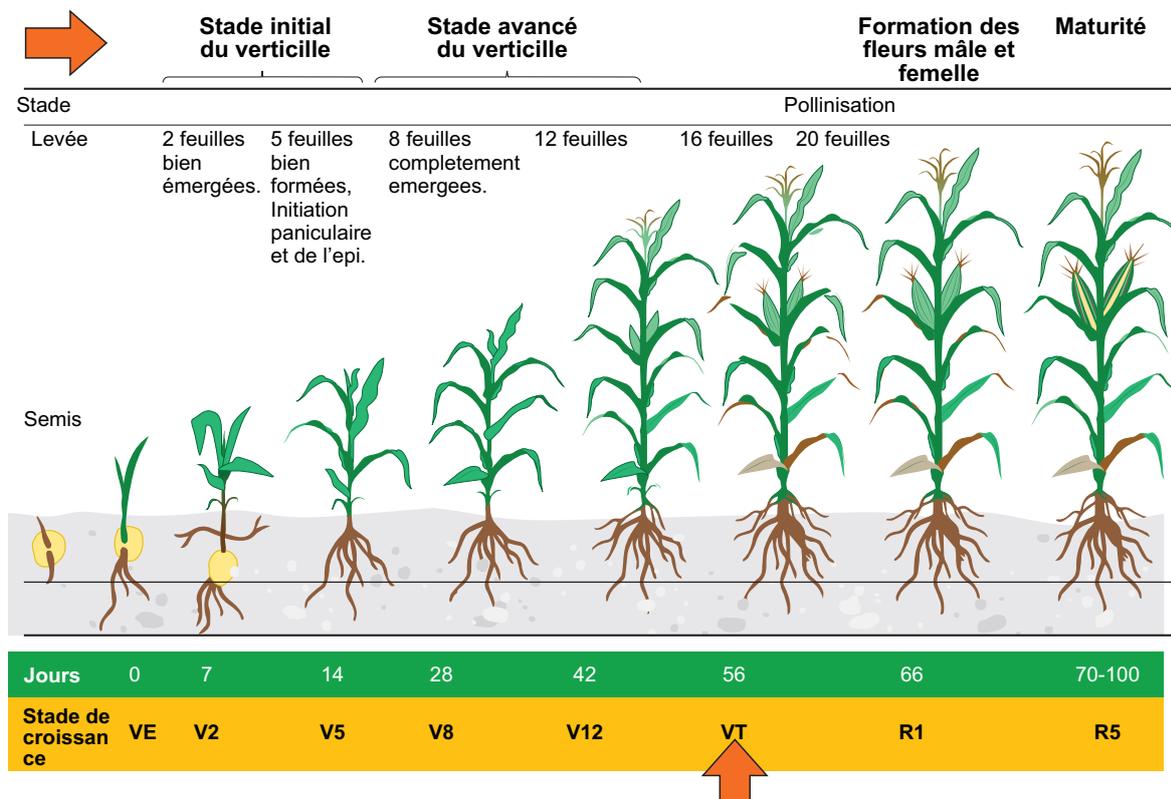


Figure 6. Stades de développement du maïs (Modifiée à partir des données fournies par Clarrie Beckingham, 2007, <https://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/horticulture/vegetables/commodity-growing-guides/sweet-corn>). Les flèches orange indiquent les étapes critiques à envisager.

Une simplification pratique serait d'appeler de VE à V6 "Stade initial d'apparition du verticille", les phases V7 à VT "Stade avancé du verticille" et les phases R1 à R3 "Formation des fleurs mâle et femelle." Ces termes sont utilisés dans les recommandations de détection et de Seuil d'action.

Le point de croissance du maïs est en dessous du sol jusqu'à la fin du stade initial du verticille (environ V6)¹, moment auquel il peut être endommagé par les chenilles légionnaires d'automne provoquant une condition connue sous le nom de "Cœur mort" (Figure 8). L'application des pesticides, si nécessaire, est également plus facile à cibler dans le verticille à des stades V précoces et a aussi l'avantage que le traitement peut contrôler plus directement et facilement les premiers stades (du premier au troisième) larvaire de la chenille légionnaire d'automne. Enfin, l'exposition aux pesticides est beaucoup plus faible à ces stades de développement précoce parce que l'applicateur de pesticides ne dirige pas les pulvérisations vers le haut.

Au fur et à mesure que le maïs arrive à maturité, c'est-à-dire après le stade avancé du verticille (V7 et au-delà), il sera progressivement plus difficile d'avoir des pulvérisations uniformes de pesticides dans le verticille. De plus, les stades avancés des larves de chenille légionnaire d'automne (du quatrième au sixième stade larvaire), si présentes, peuvent bloquer le verticille avec de la chiure (excréments d'insecte), réduisant la capacité du pesticide à efficacement atteindre et affecter les larves de la chenille légionnaire d'automne.

Au stade VT, la fleur mâle émergée peut pousser les plus grandes larves de chenille hors du verticille. Ces larves se déplacent souvent vers l'épi en croissance, et fréquemment forent l'épi sur le côté.

La première génération de chenille légionnaire d'automne émergeant au stade V2 pourrait achever le développement, entrer en chrysalide, émerger, s'accoupler, et re-infester les plants de maïs au stade de maturité au cours de la même saison de culture. Dans de nombreux cas où la chenille légionnaire d'automne est endémique, on peut souvent voir des plants de maïs avec des générations chevauchantes de la chenille légionnaire d'automne.

¹ <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/growingpointsgalle1ry.html>

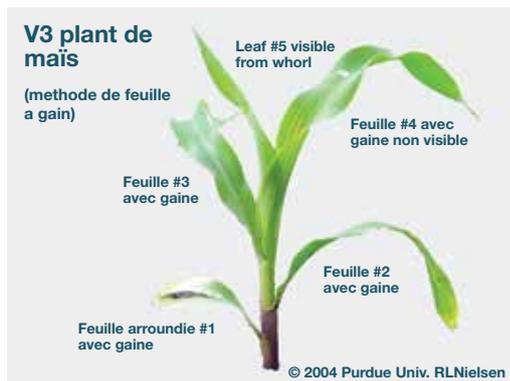


Figure 7. Stade V3 du plant de maïs pour illustrer la progression des étapes de développement. Noter que la phase V est déterminée par le nombre de feuilles avec une gaine foliaire, et non par le nombre total de feuilles visibles. (Source: R.L. Nielsen, Université de Purdue).



Figure 8. "Cœur mort" du plant de maïs causé par une infestation de la chenille légionnaire d'automne (Source: ICIPE).

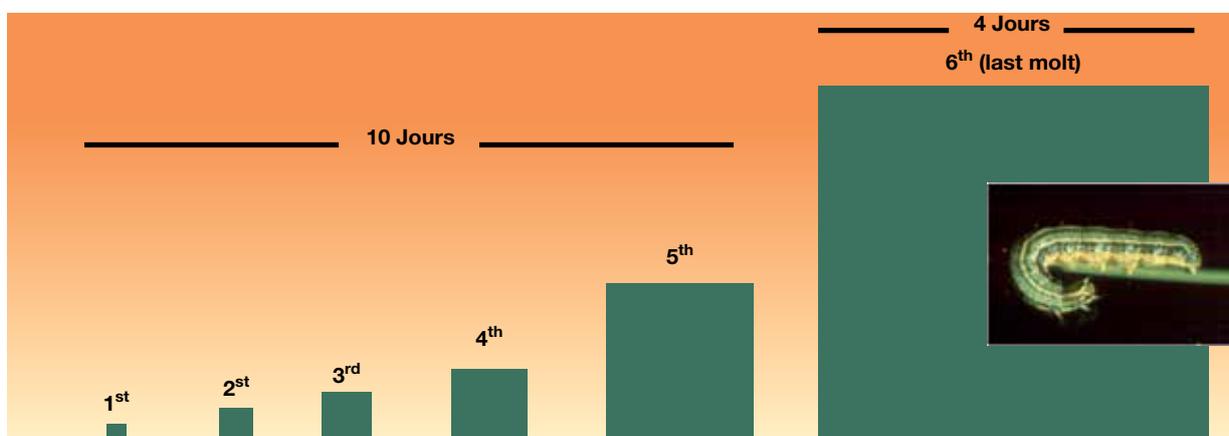


Figure 9. Quantités relatives de nourriture consommée par une chenille légionnaire d'automne durant les différents stades de croissance. Notez que la chenille se nourrit le plus au cours du dernier stade larvaire. (Source: Flanders KL, Ball DM, Cobb PP, Revised May 2017, ANR-1019 Alabama Cooperative Extension System).

3.2. Protocoles de détection

Une fois la phase de développement du maïs a été identifiée, utiliser le protocole de détection approprié (voir Sections 3.3.2 - 3.3.4) pour échantillonner le champ.

La détection devrait être axé sur une détection précoce ; plus l'insecte est petit, plus il est facile à contrôler. Idéalement, l'opération de détection devrait commencer juste après la levée (VE ; Stade initial du verticille). La chenille légionnaire d'automne achève son cycle de vie entre 30 à 40 jours et la première génération de larves de chenilles légionnaires d'automne attaque généralement les plantules à tel point que les champs devraient être revérifiés chaque semaine au stade de plantule et du stade initial du verticille.

En général, les agents de détection devraient rechercher des signes de l'éclosion des œufs de la chenille légionnaire d'automne et les signes de consommation des jeunes larves, plutôt que de chercher les jeunes larves de la chenille elle-même. Comme décrit ci-dessous (Sections 3.3.2 - 3.3.4), de tels signes incluent des caractéristiques telles que les dégâts sur les feuilles, les trous dans l'épi et la chière. La Figure 9 est une représentation adéquate non seulement pour la quantité relative que chaque larve de la chenille légionnaire d'automne consomme tout au long de sa durée de vie, mais aussi de la taille relative des larves à différents stades de développement. Les chenilles néonates (fraîchement écloses) et celles du premier stade sont très petites – de l'ordre de 1 mm – et peuvent être difficile à trouver. Cependant, avec un peu de pratique, les producteurs peuvent devenir très habiles pour détecter même les petits signes de trous creusés par les chenilles pour s'alimenter. Lorsque les larves de chenilles légionnaires d'automne sont suffisamment grandes pour être identifiées sans une loupe manuelle, elles deviennent difficiles à contrôler.

Pour tous les protocoles de détection, deux autres considérations sont à retenir:

- **SÉCURITÉ:** Toujours vérifier d'abord si le champ a été traité avec de l'insecticide et, si c'est le cas, quand et quelle est la matière active utilisée et à quel taux. Les critères de réadmission dans un champ après traitement sont marqués sur l'étiquette du pesticide, et il est important que les agents de détection ne soient pas exposés à des niveaux dangereux de pesticides lors des échantillonnages dans un champ qui ne garantit pas les conditions de sécurité pour une nouvelle visite après un traitement récent de pesticides.
- Les agents de détection devraient toujours déterminer s'il a plu et enregistrer toute pluie sur la fiche de détection (Section 5). De fortes pluies peuvent tuer les 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} stades larvaires et même si les dégâts sont présents dans le champ, il est possible que de nombreuses larves soient mortes.

3.3.1. Les modèles de détection

La détection du ravageur dans un champ de maïs consiste à évaluer avec précision le niveau d'infestation des chenilles légionnaires d'automne, généralement exprimé en pourcentage (%) des plantes infestées. Cela se fait par échantillonnage. Idéalement, l'échantillonnage devrait être aléatoire, mais échantillonner un champ d'une manière purement aléatoire est assez difficile et probablement inutile. Ce qui peut être fait facilement, c'est d'échantillonner un champ de façon semi-systématique. Une approche couramment utilisée est le modèle "W" illustré par la Figure 10. Ce modèle est particulièrement facile à suivre jusqu'au stade de la floraison mâle du maïs.

L'agent de détection entre dans le champ à environ 5 mètres (éviter les rangées de bordures du champ afin d'éviter les effets de bordure). L'agent de détection parcourt alors le champ en zigzag, s'arrêtant à 5 endroits différents. À chacun de ces endroits, il évalue 10 à 20 plantes à la recherche de signes de consommation des chenilles légionnaires d'automne (voir les Sections 3.3.2 - 3.3.4). Le pourcentage des plants endommagés est enregistré et l'agent de détection passe au point de contrôle suivant. Après avoir évalué 5 emplacements dans le champ, il détermine le pourcentage de plants endommagés dans le champ et se réfère au Tableau 1 pour obtenir des conseils sur comment déterminer si la mitigation est garantie. Ces Seuils d'action sont utilisés à la place des Seuils économiques (voir Chapitre 1) lorsque ces derniers ne sont pas disponibles. Si le village possède des données sur le seuil économique, il faut qu'elles soient utilisées comme un meilleur guide pour l'atténuation. Au lieu d'un seuil économique, les seuils d'action présentés ici, fondés sur opinions d'experts de chercheurs spécialistes de la chenille légionnaire d'automne en Afrique et dans les Amériques, devraient servir de guides précis.

Il n'y a aucune prescription sur le modèle d'échantillonnage en "W". Il faudra peut-être improviser le modèle en fonction de la phase de croissance du maïs ou de la forme du champ. Par exemple, le champ de maïs dont le semis a été dense en phase de floraison mâle ou au-delà peut être difficile à parcourir en utilisant le modèle "W". Une alternative serait d'utiliser le modèle "maille" présenté dans la Figure 11. Dans cette méthode, les lignes A à E sont utilisées comme allées pour facilement parcourir le champ de manière semi-systématique.

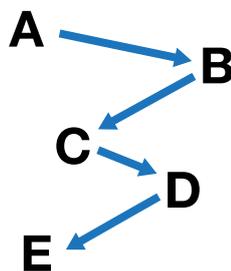


Figure 10. Exemple d'un modèle de détection dans un champ de maïs aux stades initial et avancé du verticille.

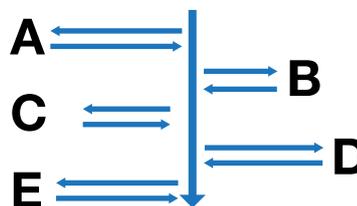


Figure 11. Exemple de modèle de détection dans un champ de maïs aux stades végétatif et reproductif.

3.2.2. La détection au stade initial du verticille (VE-V6)

- i. Dès l'arrivée dans le champ, surtout les petits champs, arrêtez-vous et faites rapidement une évaluation visuelle. Parfois les infestations ponctuelles dans un champ peuvent être vues à ce stade. De même, recherchez les "zones à problèmes" pendant que vous circulez dans le champ.
- ii. Déplacez-vous rapidement dans le champ. (Cela devient plus facile avec l'expérience.) Arrêtez-vous 5 fois. Examinez divers endroits dans le champ (mais évitez les rangées de bordure).
- iii. À chaque arrêt, examinez 10 à 20 plants. Focalisez-vous sur les deux ou trois (2 à 3) feuilles les plus récentes qui émergent du verticille, comme c'est par là que la chenille légionnaire d'automne aime se nourrir et où les papillons de cette dernière pondent leurs œufs.
- iv. Dans certains cas, les larves de la chenille légionnaire d'automne coupent et déchirent les plantules (Figure 12). Ce dégât est très semblable à celui des dégâts du vers gris. Généralement, l'insecte incriminé peut être trouvé caché dans la saleté ou les débris des plants coupés. Les plants de maïs ainsi endommagés peuvent être replantés si nécessaire.



Figure 12. Plantes coupées et déchirées au stade initial du verticille. Les dégâts causés par la chenille légionnaire d'automne lors des premiers stades de croissance peuvent souvent être confondus avec les dégâts causés par le vers gris.



Figure 13. Dégâts causés par les jeunes larves de la chenille légionnaire d'automne sur les feuilles de maïs sous forme de sténopé ou de petites plages transparentes.

- v. Lorsque les plants sont jeunes et que les tissus des feuilles sont mous, les larves de la chenille légionnaire d'automne au premier stade produisent des dégâts de type sténopé ou de petites "plages transparentes" rondes (Figure 13). Notez le nombre de plantules (sur 20) qui présentent ce type de dégâts.
- vi. Plus tard, à mesure que les tissus des feuilles arrivent à maturité et deviennent plus fibreuses et dures, les plages transparentes peuvent être dispersées et allongées plutôt que regroupées (Figure 14). La largeur des plages transparentes reflète la largeur de la capsule de la tête des larves.
- vii. En raison de la nature du chevauchement des générations de chenilles légionnaires d'automne, il serait utile de distinguer les vieux dégâts des récents. Aux fins de détection, n'enregistrez que les nouveaux dégâts.



Figure 14. Dégâts des premiers stades larvaires de la chenille légionnaire d'automne sur les feuilles des plants de maïs.

- viii. Les signes d'infestation du verticille comprennent des petites plages transparentes récemment créées (dans le verticille), des larves de la chenille légionnaire d'automne, des matières fécales fraîches (chiure) et des dégâts récents sur le verticille.
- ix. Les dégâts liés à la consommation du verticille résultent de l'expansion des feuilles endommagées hors du verticille, produisant une série horizontale de sténopés à travers un "pincement" de la feuille (Figure 15).
- x. Enregistrer le nombre de plantules dont les verticilles ont été infestés et calculez le pourcentage d'infestation pour cette localité échantillonnée (voir Fiche de détection dans la Section 5).



Figure 15. Les chenilles légionnaires d'automne se nourrissent dans le verticille. Au fur et à mesure que la feuille apparaît, un motif découpé sous forme de "poupée en papier" émerge. Cela se produit lorsque les larves se nourrissent sur la feuille enroulée dans le verticille.

- xi. Maintenant, passez à l'endroit suivant. Examinez 10 à 20 plants. Enregistrez les données. Répétez le processus 5 fois au total.
 - xii. Après le repérage des 5 emplacements dans le champ, calculez le pourcentage total de l'infestation dans le champ. Ensuite, consultez le Tableau 1 pour déterminer si le Seuil d'action recommande un traitement chimique.
- **Seuil d'action: stade initial du verticille:** Si 20% (entre 10 et 30%) des plantules sont infestés, une application d'insecticide est justifiée. De nombreux praticiens choisissent le pourcentage en bas de 10 % comme seuil d'action. Cette décision est prise en compte par la disponibilité des pesticides sans dangers, du matériel approprié et de la valeur marchande du maïs (voir Section 4).

3.3.3. La détection au stade avancé du verticille (V7-VT)

- i. Déplacez-vous rapidement dans le champ. Arrêtez-vous 5 fois. Examinez divers endroits dans le champ (mais évitez les rangées de bordure).
- ii. À chaque arrêt, examinez 10 à 20 plants. Examinez les trois à quatre (3 à 4) nouvelles feuilles qui sortent du verticille ainsi que l'inflorescence mâle émergente.
- iii. Les signes du verticille infesté comprennent des petites plages transparentes récentes (dans le verticille), des larves de chenille légionnaire d'automne, de la chiure et des dégâts récents liés à la consommation du verticille par le ravageur.
- iv. Enregistrer le nombre de plantes (sur les 20) ayant des dégâts récents, notamment des petites plages transparentes et des verticilles infestés.



Figure 16. Une inflorescence mâle émergente. Au fur et à mesure que le plant du maïs se développe, l'inflorescence mâle émergera au stade végétatif. L'inflorescence mâle va pousser les larves de la chenille légionnaire d'automne à migrer hors du verticille. Les grandes larves vont migrer du côté axial de l'épi en croissance.

- ***Seuil d'action - stade avancé du verticille:*** Si 40% (entre 30 à 50%) des plants sont infestés, un traitement d'insecticides est justifié. Comme mentionné dans le Tableau 1, de nombreux praticiens peuvent choisir le pourcentage en bas de 30 % pour lutter contre les chenilles légionnaires d'automne. Une fois que de meilleures données économiques seront disponibles, la décision sera basée sur le Niveau de préjudice économique. Provisoirement, ces lignes directrices, fondées sur l'opinion d'experts, devrait marcher (voir section 4).
 - » L'application d'insecticides au cours des stades initial et avancé du verticille réduisent non seulement la consommation foliaire par les chenilles légionnaires d'automne, mais aussi réduisent la densité des chenilles au fur et à mesure que les inflorescences mâles commencent à sortir (Figure 16).

3.3.4. Repérage au stade de l'apparition des inflorescences mâles et femelles (R1–R3)

- i. Déplacez-vous rapidement dans le champ. Arrêtez-vous 5 fois. Le modèle de repérage "maille" peut s'avérer utile à ce stade. Examinez divers endroits dans le champ mais évitez les bordures à cause d'effets de bordure. À chaque arrêt, examinez 10 à 20 plantes.
- ii. Lorsque la fleur mâle émerge, elle pousse les larves de la chenille légionnaire d'automne hors du verticille. À partir de ce moment, les larves de la chenille légionnaire d'automne se cachent à l'aisselle des feuilles, à la base et/ou à l'extrémité de l'épi. (À ce stade, il n'y a plus de verticille pour que la larve se cache).
- iii. Examinez chaque épi et les soies. Les larves de la chenille légionnaire d'automne mangent non seulement le milieu de l'épi, mais aussi infestent la pointe. Examinez une feuille immédiatement au-dessus et en dessous de chaque épi.
- iv. Assurez-vous d'identifier toutes larves trouvées. Les meilleurs "signes au champ" pour identifier les petites chenilles légionnaires d'automne sont les quatre points formant un carré sur le huitième segment abdominal (Figure 17).



Figure 17. "Quatre points en carré" (indiqués par la flèche) sur le 8^{ème} segment abdominal.

- **Seuils d'action: stade des inflorescences mâle et femelle:** Si 20% (entre 10–30%) des plants à fleur mâle sont infestés avec la chenille légionnaire d'automne ou ont des épis endommagés (Figure 18), l'utilisation d'insecticide peut être justifiée. Voir la [section 4](#) pour des considérations importantes et des précautions à propos de l'utilisation d'insecticide à ce stage.



Figure 18. Dommage de l'épi causé par les larves de la chenille légionnaire d'automne.

4. Seuils d'action et recommandations

Le tableau suivant résume les recommandations actuelles du seuil d'action.

Tableau 1. Résumé des seuils d'action contre la chenille légionnaire d'automne. Les seuils sont exprimés comme pourcentages de plants présentant des dommages/lésions/symptômes typiques de la chenille légionnaire d'automne.

Stade du maïs	Stade V	Seuil d'action pour le petit exploitant agricole	Seuil d'action pour le producteur pionnier local
Stade initial du verticille	VE- V6 (la levée) -V6	20% (10-30%)	20% (10-30%)
Stade avancé du verticille	V7-VT	40% (30-50%)	40% (30-50%)
Stade d'apparition des inflorescences mâle & femelle	R1-R3	<u>PAS DE PULVÉRISATION</u> Sauf si elle a une faible toxicité et soutient la conservation de la lutte biologique	20%

Les éléments suivants doivent être pris en compte lors de l'interprétation des seuils d'action dans le Tableau 1:

- Les recommandations sont présentées pour le médian des intervalles, Par exemple 20% (Intervalle entre 10 et 30%).
- Les recommandations sont présentées comme seuils d'action fondés sur l'opinion d'expert, y compris les praticiens en Afrique et dans les Amériques. Ces estimations seront révisées en tant que seuils économiques lorsque les données seront disponibles. Par conséquent, les producteurs devraient consulter les conseillers en vulgarisation du pays hôte autant que possible pour des conseils sur les temps réel d'utilisation du Tableau 1.
- Dans certaines circonstances, les praticiens ont choisi le seuil d'action plus faible (10 %) pour traiter le maïs au stade initial du verticille. En revanche, d'autres praticiens peuvent choisir un seuil d'action plus élevé basé sur leur expertise et la situation locale.
- La décision de traiter le plus tôt et à plus bas seuil d'action est fondée sur le fait que de nombreux petits exploitants agricoles n'ont pas d'Équipement de Protection Individuelle (EPI), de matériel de pulvérisation approprié et de connaissances sur l'utilisation sans danger des pesticides. Le traitement à un stade précoce de la croissance du maïs (avant le stade végétatif VT) peut aider à éliminer les situations où les petits exploitants agricoles pulvériseraient lors des stades végétatifs ou reproductifs.
- **Nous ne recommandons pas que les petits exploitants agricoles appliquent un insecticide pendant ou après le stade végétatif parce qu'il est très dangereux pour la personne qui pulvérise et pour sa famille.**

Autres considérations de sécurité:

- L'utilisation sans danger des insecticides nécessite un EPI. Les effets toxiques des pesticides ne sont pas faciles à identifier.
- Si des pulvérisations sont utilisées, des insecticides efficaces à faible toxicité existent et devraient être utilisés lorsqu'ils sont disponibles afin de conserver les ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne et de limiter l'exposition humaine aux produits chimiques. Voir le Chapitre 3 pour plus d'informations sur l'utilisation des pesticides.
- La première édition du guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne ne traite pas de la formation sur les épandeurs de pesticides (celui qui traite le produit chimique). Entre temps, veuillez consulter des experts spécifiques nationaux. Le manuel de formation: Introduction à la lutte intégrée contre les ravageurs (2011), produit par « CropLife International » est également une bonne ressource de référence. <https://croplife-r9qnrxt3qxgja4.netdna.ssl.com/content/uploads/2014/04/IPM-Trainee-Manual-2011-update.pdf>.
- Les petits producteurs agricoles et leurs familles risquent d'être exposés à des pesticides extrêmement dangereux.
- Les petits producteurs agricoles ignorent parfois le délai avant récolte des insecticides. Les épis de maïs verts ayant été récemment pulvérisés ne doivent pas être utilisés pour la consommation immédiate, car cela peut présenter un risque sérieux d'exposition aux produits chimiques.
- Les petits producteurs agricoles devraient appliquer des mesures de contrôle précocement, mais en se basant sur les seuils d'intervention (Tableau 1), lorsque les larves de la chenille légionnaire d'automne sont petites. En plus d'être le moment le plus sécuritaire d'application, ce calendrier réduira la densité larvaire de la chenille légionnaire d'automne lorsque les plants vont commencer par former les épis.

Les clés pour une lutte intégrée et moins toxique contre la chenille légionnaire d'automne incluent la détection précoce et l'harmonisation des tactiques de lutte biologique, culturelle et chimique:

- La détection précoce des infestations de la chenille légionnaire d'automne nécessite un échantillonnage rapide et régulier dans le champ. Le planning peut être aidé par l'utilisation des pièges à phéromone.
- L'harmonisation des tactiques de contrôle soutient et renforce l'impact des ennemis naturels (voir Chapitre 5 sur la lutte biologique). Lorsque la pression des ravageurs est modérée ou faible, choisissez des insecticides qui ne sont pas toxiques pour les insectes bénéfiques. Les grains de pollen du maïs peuvent attirer des abeilles. Ainsi, il est conseillé d'appliquer les insecticides tard dans la journée juste avant le crépuscule, lorsque les abeilles et les autres insectes pollinisateurs sont retournés à leurs ruches.
- Les petits producteurs agricoles peuvent recourir à des mesures de contrôle peu coûteuses, qui demandent plus de travail, mais néanmoins efficaces. Par exemple, ils peuvent chercher des masses d'œufs dans le champ et les écraser avec leurs doigts. Ils peuvent aussi chercher des larves qui peuvent servir de nourriture aux poulets.
- De nombreuses méthodes de lutte culturales dont la main-d'œuvre est trop importante pour les producteurs commerciaux (par exemple la collecte des larves) peuvent avoir un sens pour les petits producteurs agricoles, surtout s'ils n'ont aucun autre moyen de contrôle et si la main d'œuvre ne constitue pas un problème.

4.1. Prendre une décision de traitement sans danger/ de non traitement - le processus de « répétition en quatre étapes »

- Il est important de chercher des occasions pour ne pas pulvériser des pesticides chimiques contre la chenille légionnaire d'automne. La combinaison du suivi et de détection offre la possibilité la plus fiable sur les décisions de "non-traitement".
- Une séquence de prise de décision en quatre étapes¹ devrait être considérée avant de prendre une décision de traitement chimique.
- La séquence en quatre étapes utilise les informations suivantes:
 1. Le nombre de papillons à l'échelle régionale et locale.
 2. Les prévisions météorologiques (probabilité de pluie).
 3. La détection systématique du ravageur au champ.
 4. Les Seuils d'action.

4.1.1. Instructions pour le processus de répétition en quatre étapes

i. Avant d'arriver au champ:

- Vérifier le nombre de papillon à l'échelle régionale (**étape 1**).
- Vérifier les prévisions météorologiques (**étape 2**).

ii. Au champ:

- Vérifier le piège à phéromones (**étape 3**).
- Effectuer la détection dans le champ et appliquer un Seuil d'action (**étape 4**).

Si les chiffres sur les papillons à l'échelle locale et régionale sont faibles, et il y a très peu de chance pour l'infestation de la culture par la chenille légionnaire d'automne, ceci est considéré comme un environnement de prise de décision "deux fois sécurisés": (1) il n'y a pas de chenille légionnaire d'automne dans le champ ; et (2) il n'y a pas de nouveaux papillons qui pondent dans le champ.

iii. Répétition:

- Dans le cas d'une décision de « traitement chimique», revenez dans 7 à 10 jours. L'utilisation d'un EPI lors de la nouvelle visite dans le champ est nécessaire. Il est également important de connaître quelles sont les instructions en matière de retour dans le champ après traitement pour le produit chimique spécifique utilisé. Répétez les quatre étapes.

¹ Ce processus de Répétition en quatre étapes est une adaptation du processus de répétition en cinq étapes mis au point par Dan McGrath.

- En cas de décision du « non traitement », revenez dans 4 à 7 jours. Répétez les quatre étapes. Le nombre de jours dépend de votre proximité du Seuil d'action. Si vous êtes proche, l'intervalle de 4 jours est recommandé.
- NOTE: Dans tous les cas, respectez les instructions en matière de délais appropriés de retour.

4.2. Gestion de la résistance aux insecticides (IRM)

- Les insecticides, s'ils sont utilisés de manière appropriée et conformément au mode d'emploi figurant sur l'étiquette (voir Chapitre 3), sont un puissant instrument sans danger de lutte contre les ravageurs. Cependant, une mauvaise utilisation peut amener l'insecte à développer une résistance à la matière active, en plus de causer des dommages aux ennemis naturels et à l'environnement. Ceci est particulièrement important avec la chenille légionnaire d'automne, car l'insecte a une longue histoire de résistance aux insecticides. Par conséquent, des précautions nécessaires devraient être prises pour éviter le développement de la résistance de l'insecte.
- La chenille légionnaire d'automne dans les climats tropicaux achève leur cycle de vie dans 30 à 40 jours. Évitez de traiter les générations successives de la chenille légionnaire d'automne avec la même matière active.
- Alternez la matière active avec des produits qui ont des matières actives de différents modes d'action tous les 30 jours.
- L'étiquette de pesticides spécifie la fréquence et à quel taux un insecticide doit être appliqué par saison. Ces instructions sont fondées sur la recherche et visent à ralentir le développement de la résistance aux insecticides chez la population de chenilles légionnaires d'automne.
- Appliquez aux taux, aux intervalles et aux totaux saisonniers recommandés, selon l'étiquette et les instructions.

4.3. Objectifs éducatifs

- La chenille légionnaire d'automne est un insecte nuisible nouvellement introduit en Afrique. Par conséquent, de nombreux producteurs ne connaissent pas le ravageur et ont besoin d'une formation sur la sécurité des pesticides et le délai avant récolte des insecticides spécifiques utilisés pour lutter contre la chenille.
- Les producteurs pionniers locaux devraient être informés des tendances régionales de pontes, devraient savoir comment déterminer le niveau d'infestation de la chenille légionnaire d'automne dans leurs champs de maïs (% de plants infestés) et appliquer les seuils d'action afin de réduire les applications d'insecticides inutiles et coûteuses.
- Les petits producteurs agricoles devraient utiliser la même approche générale de prise de décision basée sur la détection que les grands producteurs ou les producteurs semenciers, à l'exception que la pulvérisation après le stade végétatif dans le champ de maïs sont à éviter.
- Les professionnels en agriculture ont besoin de formation pour améliorer leur connaissance, leur confiance en soi, leur niveau de compétence et leur bonne volonté pour prendre des décisions de non traitement lorsqu'il est possible de sauter un traitement insecticide sans danger.

5. Fiche de détection

Date de semis:	District:	Lieu:					Votre nom:													
Date d'échantillonnage		Semaine 1					Semaine 2					Semaine 3								
Stade de croissance du maïs:																				
Dates des pluies/intensité:																				
Insecticides utilisés/Taux/Dates:																				
Données du piège à phéromone		Augmenter la hauteur du piège au fur et à mesure que le maïs grandit. Gardez le fond du piège à 30 cm au-dessus des plants																		
Nombre de papillons de la chenille légionnaire d'automne:																				
Nombre de papillons de la chenille légionnaire d'Afrique:																				
Stade initial du verticille (VE -V6)		Examinez les deux à trois (2 à 3) nouvelles feuilles sortant du verticille																		
Cinq arrêts		1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	%
#Plants avec des récentes petites plaques transparentes /Total																				
#Plants avec des verticilles infestés / Total																				
Stade avancé du verticille (V7-VT)		Examinez les trois à quatre (3 à 4) nouvelles feuilles sortant du verticille et la fleur mâle émergente.																		
Cinq arrêts		1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	%
#Plants avec des récentes petites plaques transparentes / Total																				
#Plants avec des verticilles infestés / Total																				
Stade de la floraison mâle & femelle (R1 -R3)		Examinez l'épi ou les épis et les feuilles et les aisselles des feuilles situant juste au dessus et en dessous des épis.																		
Cinq arrêts		1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	%
# Plants avec aucun dégât récent/ Total																				
#Plantes avec des chenilles (larves)/Total																				
#Plantes avec épi attaqué/ Total																				



CHAPITRE 03

Gestion des risques et dangers liés aux pesticides et leur compatibilité avec la lutte intégrée contre le ravageur

Auteurs: Paul C. Jepson, Katie Murray, IPPC, Université d'État de l'Oregon, États-Unis ; Oliver Bach, Réseau d'Agriculture Durable, Costa Rica ; Donald Kachigamba, NPPO, Malawi ; Francis Ndeithi, Syngenta, Kenya ; Joseph Kibaki Miano, Bayer, Kenya ; Tracy McCracken, USAID, Kenya ; David Onyango, CABI, Kenya ; Isaiah Nthenga, ZARI, Zambie ; Komi Agboka, Université de Lomé, Togo ; Stephen Byantwala, Ministère de l'Agriculture, de l'Industrie Animale et des Pêches, Ouganda ; et Hugo De Groote, CIMMYT-Kenya.

Examiné par le Western Pesticide Risk Reduction Workgroup (un groupe de coordonnateurs de la lutte intégrée financé par l'USDA et provenant de 14 États américains de l'Ouest et des territoires des îles du Pacifique).

1. Introduction

Ce chapitre a été conçu à l'occasion d'un atelier organisé à Entebbe (Ouganda) auquel ont participé de nombreux coauteurs et avec des ajouts de deux autres ateliers de formation et de sensibilisation sur la gestion des chenilles légionnaires d'automne à Harare et Addis Abeba.

Nous avons utilisé ici plusieurs approches pour répondre à un ensemble complexe de besoins associés à la gestion et à l'utilisation des pesticides contre les chenilles légionnaires d'automne, sachant que les pesticides sont déjà largement distribués aux petits producteurs agricoles touchés par l'attaque des chenilles légionnaires d'automne en Afrique qui pourraient manquer d'expérience préalable quant à leur application.

En ce moment de fortes attaques des chenilles légionnaires d'automne en Afrique, nous savons que l'utilisation des pesticides est probablement justifiée dans certaines circonstances, mais nous n'avons actuellement pas suffisamment d'éléments sur des situations où les avantages liés à leur utilisation sont susceptibles de dépasser les risques qu'ils peuvent présenter. Nous savons également que l'expertise dans l'utilisation efficace des pesticides est limitée dans de nombreuses régions du continent. Une application inefficace des pesticides peut entraîner une certaine réduction des ravageurs, mais peut aussi causer des dommages aux populations d'insectes bénéfiques, et pourrait entraîner une augmentation de la pression de la population de ravageurs et des dommages qu'ils infligent aux cultures. Elle peut aussi entraîner des effets inacceptables pour la santé humaine. Enfin, le marché africain des pesticides est complexe, avec des voies informelles de distribution des produits non étiquetés et des capacités limitées des services de réglementation pour éliminer progressivement les composés extrêmement dangereux et les remplacer par des produits chimiques économiques, efficaces et à faible risque (*par ex.*, De Bon *et al.* 2014 ; Donald *et al.* 2016 ; Jepson *et al.* 2014 ; Pretty & Bharucha 2015).

Les versions ultérieures du présent chapitre et des publications connexes résumeront les informations sur l'efficacité des pesticides de synthèse et des bio-pesticides à partir d'expériences rigoureusement menées, examineront les conditions d'application qui maximisent leur efficacité, examineront les niveaux de résistance à certaines classes de composés et quantifieront les risques pour la santé humaine et l'environnement qui doivent être considérés face à un accès limité des producteurs à l'éducation et aux équipements de protection.

Dans cette première version, nous cherchons à fournir:

1. Des informations sur les obstacles et les possibilités de mise en œuvre de la lutte intégrée contre le ravageur et une gestion efficace des pesticides.
2. Des lignes directrices accessibles et pratiques pour la lutte intégrée contre le ravageur.
3. Une discussion sur la façon dont les pesticides peuvent s'intégrer dans un modèle de ligne directrice de lutte intégrée contre le ravageur.
4. Une identification des pesticides pour lesquels les risques pour la santé humaine et l'environnement sont susceptibles de dépasser les avantages escomptés.
5. Un résumé des étapes simples pouvant réduire les risques d'utilisation des autres pesticides.

Nous avons adopté une approche concertée et inclusive en élaborant ce chapitre qui pourrait être élargi encore davantage. Nous avons inclus des spécialistes de la vulgarisation et des chercheurs universitaires, des experts techniques de l'industrie des pesticides, des scientifiques des centres internationaux de recherche agricole, des agents de services de réglementation nationaux et régionaux, et des experts en politiques.

Le présent chapitre vise à réduire les pertes potentielles liées aux ravageurs en fournissant aux éducateurs et aux conseillers en vulgarisation des renseignements essentiels sur les pesticides et sur la façon de les sélectionner, et de soutenir les organismes de réglementation dotés d'une plateforme technique solide pour la prise de décisions sur l'enregistrement des pesticides. Il commencera également par une orientation sur l'utilisation efficace des pesticides avec un risque minimal (économique, sanitaire et environnemental) et d'une manière compatible avec la lutte intégrée (voir Chapitre 1).

2. Barrières et opportunités associées aux pesticides et à la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne

Les principes de la lutte intégrée ainsi que l'existence d'une large base de connaissances sur la biologie et la gestion des chenilles légionnaires d'automne établis dans d'autres pays (*par ex.* Day *et al.* 2017), constituent un fondement pour l'avancée de la lutte intégrée contre ce ravageur en Afrique. Toutefois, nous notons un certain nombre d'obstacles à l'adoption rapide de la lutte intégrée contre le ravageur à faible risque de pesticides, et nous les énumérons ci-dessous pour guider la planification de l'élaboration d'un programme de lutte intégrée contre le ravageur à différentes échelles.

2.1. Obstacles à la mise en œuvre de la lutte intégrée contre le ravageur et à la gestion efficace des pesticides

Les auteurs ont une vaste expérience dans la gestion des pesticides à travers l'Afrique et fournissent ici un résumé des obstacles ou des contraintes qui pourraient limiter l'utilité de ce chapitre et / ou limiter les impacts des informations qu'il contient ainsi que les publications futures envisagées. Ceux qui cherchent à utiliser ces informations doivent en tenir compte afin que les obstacles à l'utilisation efficace et à faible risque des pesticides puissent être traités explicitement.

Les obstacles relèvent de quatre thèmes principaux: réglementation et accès aux pesticides, capacité d'utilisation sécurisée des pesticides, engagement et éducation des producteurs, et les données sur l'économie et l'efficacité.

2.1.1. Réglementation et accès aux pesticides

- L'absence d'un marché sur et actuel des pesticides dans le secteur maïsicol limite l'expérience, la connaissance et l'accès à l'information à tous les niveaux du système, des producteurs aux éducateurs et aux chercheurs dans l'industrie, des institutions publiques et des ONG. L'explication historique de cette situation a été le faible rendement, l'instabilité des prix et l'inaccessibilité des pesticides. Cela signifie que les infrastructures pour la lutte intégrée contre le ravageur et le soutien à l'éducation sur l'utilisation des pesticides dans le secteur du maïs doivent être construites à partir de zéro si l'utilisation des pesticides est largement adoptée.
- L'achat à grande échelle de pesticides par les gouvernements peut constituer un obstacle à la réussite des programmes de lutte intégrée contre le ravageur. En général, cela est entrepris comme une solution à court terme sans les consultations nécessaires et la tendance est à l'achat des produits qui sont « perçus » comme étant très efficaces, mais qui peuvent ne pas être compatibles avec la lutte intégrée contre le ravageur ou avec les exigences pour les risques faibles en matière de santé.
- Les volumes de pesticides vendus peuvent être trop faibles dans certains pays africains pour encourager le soutien des industries pour un coût réduit des produits chimiques à faible risque qui peuvent eux-mêmes en retour nécessiter un encadrement pour leur utilisation s'ils doivent être utilisés efficacement. Sans ce soutien, les producteurs auront tendance à choisir des pesticides extrêmement toxiques qui sont souvent peu coûteux et facilement accessibles. Ce choix se justifie par le fait que les pesticides très toxiques peuvent limiter les fortes attaques du ravageur même s'ils ne sont pas appliqués de façon uniforme. Ces applications sont également accompagnées de risques élevés pour la santé humaine (*par ex.*, Jepson *et al.* 2014), et nuisent à la gestion à long terme du / des ravageur(s) ciblé(s) parce qu'elles peuvent éliminer les populations d'ennemis naturels.
- Le marché africain est actuellement dominé par des pesticides dits "génériques" qui sont en grande partie des produits chimiques plus anciens, plus toxiques et qui reçoivent peu ou pas d'appui technique de leurs fabricants et distributeurs.
- Il y a un manque de capacité de service après-vente dans une grande partie du continent pour garantir que seuls les produits dûment enregistrés atteignent les producteurs. Ceci peut entraîner une distribution clandestine de produits dangereux susceptibles de favoriser les fortes attaques de ravageurs et de nuire également à la santé humaine, à la faune et à la flore ou aux animaux domestiques (Jepson *et al.* 2014 ; Donald *et al.* 2016).
- Il existe d'excellents exemples de processus réglementaires en Afrique, y compris le système des multinationaux qui opèrent en Afrique de l'Ouest (*par ex.*, Jepson *et al.* 2014). Il y a cependant une capacité limitée à appliquer intégralement les lois et procédures qui existent, et il incombe par conséquent aux producteurs de gérer les risques liés aux pesticides.

2.1.2. Capacité de réduction des risques liés aux pesticides

- L'Équipement de protection individuelle (EPI) peut ne pas être compatible avec les conditions en Afrique et il existe des preuves que l'EPI n'est pas disponible, utilisé ou même commercialisé (*par ex.*, Williamson *et al.* 2008 ; Ajayi et Akinnifesi 2007 ; Jepson *et al.* 2014). Cela devrait restreindre les pesticides recommandés seulement à ceux qui présentent des risques faibles même lorsqu'ils sont utilisés sans l'EPI.
- Le choix du matériel d'épandage, du calibrage effectif et du moment d'application sont essentiels à l'efficacité du pesticide. Si ces éléments manquent, l'utilisation des pesticides peut augmenter de façon significative, car des applications répétées deviennent nécessaires.

- Il y a un manque d'expérience en matière de manipulation et de destruction des emballages de pesticides chez les petits producteurs agricoles. Il y a beaucoup de données historiques sur les dangers que ces emballages posent lorsqu'ils sont largement disponibles, et la prise en compte de ce danger doit faire partie de tout programme de formation en gestion des pesticides qui est entrepris.
- Il existe une capacité limitée pour la manipulation des agents de lutte biologique et pour la formulation, la manipulation des biopesticides, y compris les extraits botaniques qui pourraient offrir aux pesticides classiques et de synthèse une alternative à faible risque.
- Les compétences techniques et l'existence des infrastructures – qui sont les exigences clés pour un marché réglementé – n'existent pas toujours. Nous sommes donc préoccupés par le risque d'utilisation abusive et de surutilisation des pesticides. Les effets toxiques aigus et chroniques sur la santé pourraient ne pas être toujours documentés.

2.1.3. Mobilisation et formation des producteurs

- Il faut un mécanisme pour rendre ce document opérationnel, bien que l'on ignore encore comment les besoins des producteurs mal desservis peuvent être adressés dans l'ensemble de la grande zone d'invasion des chenilles légionnaires d'automne. Les champs écoles ont les meilleurs résultats pour répondre à ce besoin, mais il va falloir divers modes de sensibilisation et de communication.
- L'éloignement de certains publics cible et de certains groupes sous-représentés limite non seulement la possibilité de programmes de sensibilisation plus complexes à les atteindre, mais aussi celle de voir des informations cruciales sur les dangers et les risques liés à l'utilisation des pesticides créer l'impact requis. La radio et d'autres voies de communication devront être utilisées.
- L'agriculture de subsistance, par opposition à l'agriculture commerciale, représente un public cible intéressant à forte demande d'informations pour les programmes de lutte intégrée contre le ravageur bien que se soit la forme dominante d'agriculture exposée aux chenilles légionnaires d'automne. Des informations importantes sur les dangers et les risques liés à l'utilisation des pesticides doivent être présentées d'une manière accessible aux publics n'ayant auparavant pas utilisé des produits chimiques toxiques ou n'ayant pas été exposés aux concepts fondamentaux de la lutte intégrée contre le ravageur (Parsa *et al.* 2014 ; Pretty et Bharucha 2015 ; Settle *et al.* 2014).

2.1.4. Données sur l'efficacité et l'économie

- On constate actuellement un manque de données économiques et d'informations essentielles sur l'efficacité des pesticides contre les chenilles légionnaires d'automne s'appliquant aux différentes régions de cultures et aux agro-écologies en Afrique. Il n'est pas possible actuellement pour quiconque d'élaborer et de faire des recommandations sur l'utilisation des pesticides qui soient localement adaptées en tenant compte des produits chimiques disponibles, des conditions locales et des coûts.
- Les coûts des effets imprévus des pesticides sur la santé humaine (ex., Maumbe et Swinton 2003) ne sont pas pris en compte dans les évaluations actuelles de l'adéquation de certains pesticides dans la lutte contre les chenilles légionnaires d'automne.

2.2. Lignes directrices accessibles et pratiques de la lutte intégrée contre le ravageur

Les programmes de lutte intégrée contre le ravageur sont adoptés et mis en œuvre avec succès lorsqu'ils ont des objectifs clairs qui tiennent compte des besoins et des conditions des producteurs qu'ils sont censés servir.

Les exemples d'objectifs incluent:

1. Mettre en place un système de culture durable qui minimise les risques économiques (sécurité alimentaire), sanitaires et environnementaux.
2. Surmonter les obstacles à l'adoption de la lutte intégrée contre le ravageur.
3. Incorporer de nouvelles découvertes pratiques lorsque celles-ci deviennent disponibles.
4. Maximiser les contributions de tous les intervenants dans le processus.

Ce sont là des objectifs typiques tirés de diverses communautés agricoles aux États-Unis et en Afrique de l'Ouest par l'Université d'État d'Oregon, mais ils peuvent varier en fonction du contexte et de la façon dont les producteurs les expriment dans différents endroits.

Habituellement, un groupe de producteurs sera consulté pour déterminer leurs buts et / ou résultats souhaités qui sont ensuite traduits pour s'adapter aux principes testés et éprouvés de la lutte intégrée:

1. Prévenir ou éviter les pertes importantes de cultures en utilisant la résistance variétale et les méthodes culturales (voir Chapitres 4 et 6), et tolérer les pertes sub-économiques de culture.
2. Identifier la chenille légionnaire d'automne, la distinguer des autres lépidoptères ravageurs du maïs, les suivre et les détecter (voir Chapitre 2), et intervenir au niveau des infestations potentiellement dangereuses à l'échelle communautaire et de la parcelle.
3. Contrôler les chenilles légionnaires d'automne et autres ravageurs par la lutte biologique (voir Chapitre 5), physique et si nécessaire, chimique, en considérant un seuil localement validé et avec un faible risque pour la santé humaine et l'environnement.
4. Entreprendre collectivement les activités de sensibilisation, de recherche et de réglementation nécessaires pour faciliter les progrès.

Le fait d'avoir des objectifs clairs, exprimés par les producteurs, permet d'harmoniser les possibilités d'adoption des pratiques de lutte intégrée dans le contexte des systèmes agricoles locaux, ce qui accroît considérablement les possibilités d'assimilation et d'adoption de la lutte intégrée contre le ravageur (*par ex.*, Pretty et Bharucha 2015 ; Settle *et al.* 2014).

Parmi les défis spécifiques à une lutte intégrée efficace contre les chenilles légionnaires d'automne, il faut mentionner:

1. La chenille légionnaire d'automne est un nouveau ravageur qui est encore en train de s'implanter - créant ainsi une alarme lorsque les dégâts sont perçus pour la première fois.
2. Les options de prévention et de dérobade (*par ex.*, les semis précoces) ne sont pas encore largement pratiquées en Afrique bien qu'il y ait un potentiel considérable à les adopter par le biais de programmes de sensibilisation appropriés.
3. Les méthodes de suivi et de détection ont été élaborées, mais elles n'ont pas été largement diffusées. Des programmes de sensibilisation et de soutien sont nécessaires pour promouvoir un suivi et une détection efficace ainsi que des interventions.
4. Des pesticides efficaces et à faible risque sont nécessaires ; la suppression s'est concentrée jusqu'à présent sur des pesticides extrêmement dangereux qui présentent des conséquences sanitaires et environnementales et qui peuvent supprimer la lutte biologique tout au long de la saison.
5. Les processus de sensibilisation, de recherche et de réglementation ne sont pas encore intensifiés et coordonnés.

Nous proposons ce simple cadre de la lutte intégrée contre le ravageur ci-dessous comme un aspect majeur de la gestion des risques liés aux pesticides (Figure 1). Le critère clé de cessation de la pulvérisation après la phase d'apparition de l'inflorescence mâle (VT) est recommandé aux petits producteurs agricoles qui n'ont pas accès à la formation et qui manquent également d'EPI adéquat. Ce seuil a un objectif explicite de gestion des risques liés aux pesticides, parce que l'exposition des producteurs et de leurs familles aux résidus de pesticides sera élevée dans une culture mature, haute et qui couvre les gens qui y entrent. Les coûts des soins de santé vont probablement dépasser les avantages potentiels des épandages de pesticides qui au-delà de cette phase de croissance manqueront d'efficacité avec un matériel d'application portatif. Il est reconnu que les agriculteurs modernes ayant des niveaux de formation plus élevés et qui ont accès aux EPI ainsi qu'à l'équipement de pulvérisation appropriés peuvent choisir de traiter leurs champs au-delà du stade « VT », mais pour la majorité des producteurs à faibles ressources, cela une fois encore n'est pas recommandé. Même pour les producteurs modernes, il faut reconnaître que l'EPI n'est pas adéquate lorsque les pesticides sont extrêmement dangereux, les organophosphorés et les carbamates sont utilisés ; la pulvérisation au-delà du stade VT ne s'applique qu'aux produits chimiques à moindre risque.

Considérant ce critère, le rôle de tout pesticide utilisé avant le stade « VT » est de contribuer à l'élimination maximale des populations de ravageurs potentiellement nuisibles d'une manière qui complète la suppression biologique et culturale des ravageurs. Ceci repose sur: (1) le suivi et la détection pour déterminer si oui ou non le traitement est justifié et (2) la capacité à sélectionner et à s'approvisionner en pesticide qui peut être appliqué efficacement avec un faible risque pour la santé humaine et environnementale. Nous soulignons également ici que si des pesticides à large spectre sont appliqués à un stade précoce de la croissance de la culture, les agents de lutte biologique désirables peuvent être éliminés des champs pendant toute la saison de culture (Jepson 2007, 2009 ; Sherratt & Jepson 1993).

Les versions ultérieures de ce chapitre et des publications supplémentaires rendront compte des impacts des pesticides actuellement utilisés sur les ennemis naturels des chenilles légionnaires d'automne et proposeront aussi des stratégies permettant aux pesticides et aux ennemis naturels de se compléter (Jepson 2007). Dans cette première version, nous fournissons des évaluations initiales de l'impact sur les ennemis naturels seulement pour les pesticides extrêmement dangereux.

3. Développement de résumés de données sur les pesticides / lignes directrices et gestion des risques

- Débutez la détection lors du stade initial du verticille (VE ce qui s'ensuit).
- Utilisez des pesticides de synthèse moins dangereux, et seulement si nécessaire (= au-delà des seuils économiques spécifiques) pour:
 - Une efficacité accrue.
 - Un faible risque pour la santé (moins d'exposition humaine).
- Application de pesticides de préférence par des agents formés à la pulvérisation et portant un équipement de protection individuel.

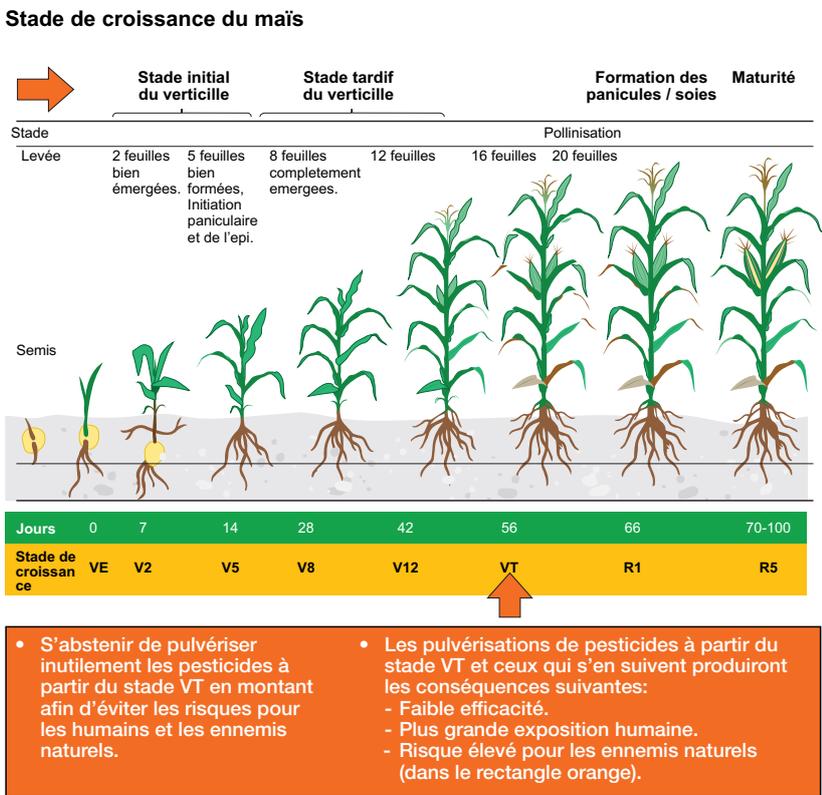


Figure 1. Modèle initial possible pour la lutte intégrée contre les chenilles légionnaires d'automne qui reconnaît les risques liés aux pesticides à l'égard des organismes non ciblés, y compris les humains, l'efficacité contre le ravageur, et comment le risque et l'efficacité varient selon le stade de croissance de la culture.

3.1. Classement des pesticides en fonction de leur compatibilité avec la lutte intégrée contre le ravageur

La matrice des critères de la lutte intégrée (Tableau 1 ; une adaptation du travail de Farrar et al. 2018) peut servir de base pour déterminer quels pesticides pourraient être compatibles avec d'autres composantes de la lutte intégrée contre le ravageur, et aussi réduire la probabilité de risques inacceptables pour la santé humaine et environnementale. Si ces critères s'avèrent largement acceptés, une démarche peut être engagée avec des partenaires dans toute l'Afrique pour évaluer les pesticides potentiels afin de fournir un processus transparent de classification des pesticides pouvant conduire à une gestion plus efficace.

La matrice ci-dessous décrit les façons dont les utilisations proposées de pesticides pourraient s'intégrer dans un programme de lutte intégrée contre le ravageur. Elle englobe un certain nombre de facteurs spécifiques dans huit catégories: l'efficacité, l'économie, les effets non ciblés, les problèmes de résistance, le devenir environnemental, le risque pour les travailleurs, la compatibilité avec le suivi et l'utilité.

Chaque facteur peut être évalué par la description des attributs de compatibilité affirmative, intermédiaire et négative. Ensemble, les facteurs décrits dans la matrice des critères de lutte intégrée contre le ravageur incorporent les principes de la lutte intégrée comme méthode systématique de traitement des problèmes de lutte contre les ravageurs avec les exigences pragmatiques d'une agriculture économiquement viable en Afrique.

On notera en particulier pour les chenilles légionnaires d'automne une résistance généralisée à de nombreuses classes de pesticides, y compris les pyréthroïdes de synthèse, qui peuvent être largement utilisés en Afrique (<https://www.pesticideresistance.org>). Cela soulève l'importance de considérer la problématique de la résistance dans la détermination de la compatibilité des pesticides avec la lutte intégrée. Sans une compréhension claire du mode de résistance aux pesticides existant au niveau de la chenille légionnaire d'automne, les méthodes alternatives de lutte intégrée contre le ravageur autres que les pesticides devraient être mises en œuvre au sens large que possible, et l'activité d'ennemis naturels devrait être maximisée en premier lieu, en évitant les insecticides à large spectre qui sont toxiques pour les insectes, les arachnides et les acariens prédateurs ainsi qu'aux parasitoïdes des ravageurs du maïs, y compris les chenilles légionnaires d'automne.

Tableau 1. Matrice de critères pour la lutte intégrée.

Attribut	Critères affirmatifs	Critères intermédiaires	Critères négatifs
Efficacité			
Efficacité	<i>Données provenant des essais de terrain en conditions environnementales / climatiques identiques prouvent une bonne efficacité contre le ravageur cible</i>	<i>Données démontrant une efficacité contre le ravageur cible obtenues dans des conditions environnementales / climatiques différentes</i>	<i>Données provenant des essais de terrain en conditions environnementales / climatiques identiques prouvent une efficacité marginale ou inconsistante</i>
Rapidité d'action et persistance contribuant à l'efficacité - sur la base des caractéristiques de la chenille légionnaire d'automne à différents stades de croissance de la culture et la susceptibilité relative des différents stades de développement des chenilles	<i>Reste à déterminer pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique</i>		
Niveau d'efficacité sous différentes pressions des ravageurs	<i>Produit efficace sous haute pression du ravageur</i>	<i>Produit efficace sous pression modérée du ravageur</i>	<i>Produit efficace uniquement sous faible pression du ravageur</i>
Applicabilité aux petits producteurs agricoles	<i>Produit à faible risque ; équipement d'épandage et EPI disponibles</i>	<i>Produit à risque modéré ; pulvérisateurs et EPI moins disponibles</i>	<i>Produit à haut risque ; pulvérisateurs efficaces et / ou EPI non assez disponibles</i>
Emballages, aspects pratiques pour leur destruction	<i>Destruction de l'emballage assurée</i>	<i>Formation et protocoles sur la destruction disponible, mais non appliqués</i>	<i>Destruction et manipulation adéquate de l'emballage non assurées</i>
Disponibilité des procédures réglementaires et du produit	<i>Produit enregistré et disponible</i>	<i>Produit enregistré mais disponibilité limitée</i>	<i>Produit non enregistré</i>
Economie			
Prix	<i>Coûts du traitement inférieurs à ceux des autres produits homologués avec une efficacité égale</i>	<i>Coûts du traitement similaires à ceux d'autres produits homologués avec une efficacité égale</i>	<i>Coûts du traitement plus élevés que ceux d'autres produits homologués avec une efficacité égale</i>
Valeur dans la gestion globale	<i>Le nombre total des applications nécessaires pour réaliser le contrôle économique a diminué</i>	<i>Le nombre total des applications nécessaires pour réaliser le contrôle économique reste constant</i>	<i>Le nombre total des applications nécessaires pour réaliser le contrôle économique a augmenté</i>
Effets sur les organismes non ciblés (voir les tableaux sur les risques et dangers ci-dessous)			
Sélectivité - Toxicité pour les pollinisateurs (abeilles et pollinisateurs indigènes)	<i>Non-toxique pour les pollinisateurs</i>	<i>Relativement non-toxique pour les pollinisateurs uniquement lorsque appliqué pendant les périodes où les pollinisateurs ne sont pas actifs</i>	<i>Toxique pour les pollinisateurs</i>
Sélectivité – Toxicité pour les arthropodes bénéfiques	<i>Non-toxique pour les arthropodes bénéfiques</i>	<i>Non-toxique pour certains arthropodes bénéfiques ; toxique pour d'autres</i>	<i>Toxique pour beaucoup d'arthropodes bénéfiques ; susceptible d'entraîner des foyers secondaires de ravageurs</i>
Sélectivité – Toxicité pour les vertébrés	<i>Risque faible ou nul pour les oiseaux, d'autres animaux sauvages et domestiques</i>	<i>Risque intermédiaire pour les oiseaux, d'autres animaux sauvages et domestiques, ou toxique à certains et pas à d'autres</i>	<i>Toxique pour les oiseaux, d'autres animaux sauvages et domestiques</i>
Sélectivité – Toxicité pour la vie aquatique (algues aquatiques, invertébrés aquatiques, ou risque chronique pour les poissons)	<i>Non-toxique à la vie aquatique</i>	<i>Toxicité intermédiaire ou variable à la vie aquatique</i>	<i>Toxique à la vie aquatique</i>
Mouvement après pulvérisation sous forme de vapeur ou à l'intérieur de la plante	<i>Le pesticide ne se déplace pas dans la plante ou le mouvement à l'intérieur de la plante n'accroît pas le risque pour les pollinisateurs, les arthropodes utiles, les autres organismes utiles ou non cibles</i>	<i>Le déplacement des pesticides à l'intérieur de la plante peut accroître le risque pour certains pollinisateurs, arthropodes bénéfiques, les autres organismes utiles ou non cibles</i>	<i>Le mouvement des pesticides dans la plante accroît le risque pour les pollinisateurs, les arthropodes utiles, les autres organismes utiles, ou non-cibles</i>
Compatible avec les méthodes de lutte culturales (par exemple, variétés résistantes, rotation des cultures, soins culturaux, la gestion de la végétation)	<i>L'utilisation des pesticides a un effet additif ou synergique avec les méthodes de lutte culturales contre le ravageur</i>	<i>L'utilisation des pesticides ne diminue pas l'efficacité ou n'entrave pas la mise en œuvre des méthodes de lutte culturale contre le ravageur</i>	<i>L'utilisation des pesticides n'est pas compatible avec ou diminue l'efficacité des méthodes de lutte culturale contre le ravageur</i>

Attribut	Critères affirmatifs	Critères intermédiaires	Critères négatifs
Préoccupations sur la résistance			
Mode d'action	<i>Le produit a un mode d'action unique pour la combinaison culture-ravageur</i>	<i>Un ou deux autres pesticides avec le même mode d'action sont disponibles pour la combinaison culture-ravageur</i>	<i>Plusieurs pesticides avec le même mode d'action sont disponibles pour la combinaison culture-pesticide</i>
Les observations sur le terrain ou les comptes rendus des producteurs sur les changements du niveau d'efficacité ou les preuves de résistance associées au pesticide candidat	<i>Aucun rapport de terrain faisant état de résistance</i>	<i>Des rapports de terrain faisant état de résistance, mais non validés</i>	<i>Des rapports de terrain faisant état de résistance validés et appuyés par des recherches</i>
Résistance potentiel basée sur un groupe de mode d'action	<i>Lorsqu'il est utilisé conformément aux instructions figurant sur l'étiquette, il existe un faible risque que des ravageurs développent une résistance aux pesticides</i>	<i>Lorsqu'il est utilisé conformément aux instructions figurant sur l'étiquette, il existe un risque modéré que des ravageurs développent une résistance aux pesticides</i>	<i>Lorsqu'il est utilisé conformément aux instructions figurant sur l'étiquette, il existe un risque élevé que des ravageurs développent une résistance aux pesticides</i>
Gestion de la résistance	<i>Utile dans le contrôle de la résistance des chenilles légionnaires d'automne</i>	<i>Potentiellement utile dans le contrôle de la résistance des chenilles légionnaires d'automne</i>	<i>Non susceptible d'être utile dans le contrôle de la résistance des chenilles légionnaires d'automne en raison de l'existence d'une résistance à la matière active (M.A.), de la résistance croisée à une matière active ayant le même mode d'action</i>
Impact environnemental			
Déplacement hors site - possibilité de dérive	<i>La méthode de formulation ou d'application des pesticides a peu ou pas d'effet sur la dérive (par exemple, les formulations granulées ou chimigation au travers des lignes d'irrigation goutte à goutte)</i>	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application a un certain effet possible sur la dérive (par exemple, pulvérisateur à rampes d'application)</i>	<i>La méthode d'application a un effet possible de dérive (par exemple, les applications aériennes ou par pulvérisateur pneumatique)</i>
Déplacement hors du site - Potentiel de ruissellement	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application n'entraînent que peu ou pas de risques de ruissellement vers les eaux de surface</i>	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application entraînent un certain risque de ruissellement vers les eaux de surface</i>	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application entraînent un ruissellement vers les eaux de surface</i>
Déplacement hors site - Risque de lessivage	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application n'entraînent que peu ou pas de risque de lessivage vers les eaux souterraines</i>	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application entraînent un certain risque de lessivage vers les eaux souterraines</i>	<i>Les pesticides ou leur méthode d'application entraînent un risque de lessivage vers les eaux souterraines</i>
Persistance des produits utilisés ou des composés issus de leur détérioration	<i>Demi-vie relativement courte</i>	<i>Demi-vie moyenne</i>	<i>Longue demi-vie, ce qui augmente le risque de mouvement hors site ou d'exposition non cible</i>
D'autres facteurs de la lutte intégrée			
Risque pour le travailleur	<i>Mention ATTENTION / risque d'inhalation « ipmPRIME » faible</i>	<i>Mention AVERTISSEMENT / Risque d'inhalation « ipmPRIME » moyen</i>	<i>Mention DANGER / Risque d'inhalation « ipmPRIME » élevé</i>
Compatibilité avec le suivi du ravageur au niveau du champ	<i>Lien étroit entre la population (ou prévision) du ravageur et le seuil de dégâts économiques</i>	<i>Absence de bonnes données sur le lien entre la population (ou la prévision) du ravageur et le seuil de dégâts économiques</i>	<i>Les applications doivent être faites de façon préventives en raison de la mauvaise relation entre les données de suivi du ravageur et les prévisions</i>
Applications préventives	<i>Réduit le besoin en intrants supplémentaires de lutte contre le ravageur plus tard</i>		<i>Augmente d'autres intrants pour lutter contre le ravageur</i>
Preuves tirées du champ sur la valeur potentielle de ce produit	<i>Compatibilité vérifiée avec les directives de prise de décision</i>	<i>Compatibilité non vérifiée avec les directives d'aide à la décision</i>	<i>Produit non compatible avec les directives d'aides à la décision</i>

* Jepson *et al.* (2014) fournissent des informations détaillées sur « ipmPRIME », et les données tirées de cet outil sont présentées ci-dessous.

3.2. Classification des risques et des dangers liés aux pesticides actuellement utilisés contre la chenille légionnaire d'automne, et propositions des mesures d'atténuation des risques

Cette partie est un résumé initial des dangers et des risques posés par les pesticides actuellement utilisés contre les chenilles légionnaires d'automne dans d'autres systèmes. Elle propose des données qui ne sont pas largement accessibles aux formateurs et aux chercheurs de la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne. Ce résumé devrait contribuer à la conception ainsi qu'à la mise en œuvre des approches préliminaires de la lutte intégrée contre le ravageur en considérant les risques sur la santé humaine, l'environnement, la pollinisation et les ennemis naturels.

3.2.1. Pesticides dangereux

Les tableaux 2 et 3 présentent les pesticides qui ont été classés comme extrêmement dangereux par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Dans tous ces cas, le risque pour la santé humaine et environnementale dépassera probablement tous les avantages potentiels dans les régions productrices de maïs en Afrique, et leur utilisation devrait donc être évitée.

Un grand nombre de ces pesticides se trouvent actuellement sur le marché et sont enregistrés comme étant utilisés contre les chenilles légionnaires d'automne (*par ex.*, Day *et al.* 2017).

La Réunion conjointe FAO/OMS sur la gestion des pesticides (JMPM), lors de sa 2^{ème} session en octobre 2008, a recommandé fortement que les pesticides extrêmement dangereux soient définis comme ayant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes (voir aussi: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/code/hhp/en/>):

- a. Les formulations de pesticides répondant aux critères des classes IA (extrêmement dangereux) ou IB (très dangereux) de la classification recommandée des pesticides par risque par l'OMS.
- b. Les substances actives des pesticides et leurs formulations répondant aux critères des produits cancérigènes des Catégories 1A et 1B du Système Général Harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH).
- c. Les substances actives des pesticides et leurs formulations qui répondent aux critères de mutagénicité des Catégories 1A et 1B du SGH.
- d. Les substances actives des pesticides et leurs formulations qui répondent aux critères de la toxicité reproductive des Catégories 1A et 1B du SGH.
- e. Les substances actives des pesticides énumérées par la Convention de Stockholm dans ses Annexes A et B, et ceux répondant à tous les critères énoncés au paragraphe 1 de l'Annexe D de la Convention (pour plus d'informations sur la classification des pesticides par risque établie par l'OMS, et les conventions qui contribuent à la classification des pesticides extrêmement dangereux voir la FAO (2014).
- f. Les substances actives des pesticides et les formulations énumérées par la Convention de Rotterdam dans son Annexe III.
- g. Les pesticides énumérés dans le Protocole de Montréal.
- h. Les substances actives des pesticides et les formulations ayant montré une incidence grave ou des effets nocifs irréversibles sur la santé humaine ou sur l'environnement.

Le Centre de Protection Intégrée des Végétaux (Integrated Plant Protection Center – IPPC) et le Réseau d'Agriculture Durable (Sustainable Agriculture Network – SAN) sont les premières organisations à avoir opérationnalisé cette définition de pesticides extrêmement dangereux, et l'utilisation des pesticides extrêmement dangereux a été largement interdite par la Norme d'Agriculture Durable (SAN 2016) et par les Listes de Pesticides (SAN 2017) dans les fruits tropicaux et subtropicaux, la production de café, de thé et de cacao. La désignation des produits extrêmement dangereux dans les tableaux 2 et 3 est tirée de cette analyse complète, qui a fait l'objet de consultations auprès des parties prenantes et d'un examen international par les pairs dans plus de 40 pays. Seulement en de très rares cas l'usage des produits extrêmement dangereux ont été notés et qui continuaient par être appliqué par nécessité sur certaines cultures, parce que les produits moins dangereux, enregistrés et efficaces comme alternatives sont presque toujours disponibles.

Les auteurs de ce chapitre soutiennent que les produits extrêmement dangereux devraient être exclus de la gestion des chenilles légionnaires d'automne et que des alternatives à ces pesticides devraient être utilisées. Si cette recommandation était appliquée, elle lèverait un certain nombre d'obstacles à l'adoption d'une lutte intégrée contre le ravageur et à la gestion efficace des risques liés à l'utilisation des pesticides cités ci-dessus ; elle prendrait aussi en compte le manque de préparation et les capacités des épandeurs de pesticides qui sont l'une de nos plus grandes préoccupations.

3.2.2. Pesticides nécessitant une atténuation des risques¹

Parmi les centaines de pesticides qui restent, après le retrait des produits extrêmement dangereux de la liste des produits disponibles, un certain nombre de produits posent toujours des risques pour la santé humaine et environnementale ; ces risques peuvent cependant être atténués par des pratiques faciles à adopter. L'IPPC et le SAN ont mené une analyse complète des risques liés aux pesticides. Cette analyse est résumée dans les tableaux 2 et 3 ci-dessous pour les pesticides dont les risques nécessitent un certain niveau d'atténuation afin de réduire leurs impacts potentiels. **Prière de noter que les auteurs, les éditeurs, l'USAID et les organisations supportées par l'USAID, y compris CIMMYT, qui ont participé à la préparation de ce manuel ne recommandent pas les pesticides énumérés dans les tableaux 2 et 3, mais inventorient simplement les produits actuellement utilisés.** Les diverses formulations et combinaisons couramment utilisées et ayant une incidence significative sur les différents choix faits par les agents certifiés de traitement phytosanitaires ainsi que les producteurs commerciaux comparés aux petits producteurs agricoles, ne sont pas considérés.

Cette méthodologie a également fait l'objet d'un examen international par des pairs, et des tableaux similaires d'atténuation des risques sont déjà utilisés dans environ un million de ménages agricoles dans les régions subtropicales et dans plusieurs États de l'ouest des États-Unis.

Les informations fournies ci-dessous sont généralement données sur les étiquettes des pesticides dans les pays occidentaux. Pour les pays africains, cependant, il se peut que les indications détaillées sur la gestion des risques ne soient pas toujours fournies sur l'étiquette.

Les risques liés aux pesticides nécessitant une atténuation dans les Tableaux 2 et 3 sont classés comme ceux pouvant affecter les travailleurs / passants, la vie aquatique, la faune, les pollinisateurs et les ennemis naturels. Dans les versions ultérieures du présent chapitre, cette gamme de risques sera élargie pour inclure les épandeurs et les travailleurs qui rentrent dans les champs après pulvérisation.

L'analyse effectuée pour ces tableaux est basée sur le modèle de l'outil « ipmPRiME » d'évaluation des risques de l'Université d'État de l'Oregon (Jepson *et al.* 2014) et sur un modèle de risque qui identifie les risques modérés à élevés (10 % ou plus) dans les catégories suivantes:

1. Risque pour la vie aquatique:

Sont qualifiés pour cette catégorie de risques, les pesticides présentant un risque élevé à un taux d'application typique dans un ou plusieurs modèles de risques aquatiques « ipmPRiME » (risques chroniques pour les algues aquatiques, les invertébrés aquatiques, ou les poissons).

2. Risque pour les animaux sauvages ou domestiques (volaille et mammifères):

Sont qualifiés pour cette catégorie de risques, les pesticides présentant un risque élevé à un taux d'application typique dans un ou plusieurs modèles de risques terrestres « ipmPRiME » (risques aigu pour l'espèce aviaire, les oiseaux reproducteurs, ou les petits mammifères).

3. Risque pour les pollinisateurs:

Les pesticides ont été sélectionnés en fonction de leur quotient de danger (QD) qui est fréquemment utilisé, et calculé en utilisant le taux d'application des pesticides (en g.m. a. / ha) et la DL50 par contact pour l'abeille (*Apis Mellifera*). Les valeurs de QD < 50 ont été validées comme étant faibles au sein de l'Union européenne et les opérations de suivi indiquent que les produits avec un QD > 2500 sont associés à un risque élevé de perte de ruches. La valeur QD utilisée par SAN est > 350, ce qui correspond à un risque de perte de ruches de 15 %. Le quotient comprend un facteur correctif pour les pesticides systémiques qui amplifient les risques de pesticides pour les abeilles.

4. Risques pour les passants:

Le risque d'inhalation pour les passants a été calculé à l'aide du modèle « impPRiME » pour la toxicité par inhalation (Jepson *et al.* 2014) calculé sur la base de l'exposition et de la susceptibilité des enfants. Cet indice protège les travailleurs qui peuvent rentrer dans des champs pendant ou après la pulvérisation, ainsi que les passants.

5. Risque pour les ennemis naturels:

Cet index est basé sur des données de bio-essais ainsi que les bases données SELECTV de l'Université d'État de l'Oregon, les données d'essai sur les effets secondaires sur les ennemis naturels publiées par l'organisation internationale de lutte biologique, et les manuels commerciaux des effets secondaires. Une classification à risque élevée, toxique ou dangereuse est appliquée dans les cas où une grande proportion (> 75 %) des sujets

¹ ipmPRiME propose des bases de données sources et des modèles d'évaluation des risques utilisés dans le développement de l'évaluation des risques de 800 composés auxquels nous nous référons. Jepson *et al.* (2014) fournissent des informations détaillées sur l'ipmPRiME.

d'essai sont tués dans les essais biologiques aux taux d'application des pesticides sur le terrain. Notre indice a cherché des données pour trois importants genres de parasitoïdes d'hyménoptères pour la lutte biologique (*Aphidius* spp. *Encarsia* spp. et *Trichogramma* spp.), un hétéroptère prédateur (*Orius* spp.) et un acarien prédateur (*Phytoseiulus* spp.). Nous avons considéré le risque de pesticide très bas dans le cas où aucun de ces genres n'a présenté de cas de toxicité selon la classification susmentionnée dans les données d'essai, et très élevée lorsqu'un de ces genres était hautement vulnérable.

Les tableaux 2 et 3 devraient servir à orienter la sélection initiale des pesticides et les pratiques d'atténuation (Section 3.2.3) qui contribuent à la réduction des risques.

Pour être efficaces, ces pratiques doivent être traduites en programmes d'éducation et diffusées sur les médias qui ont une expérience dans la conduite au changement de comportements chez les producteurs africains. Un exemple de processus de planification, de mise en œuvre et d'évaluation de programme d'éducation qui a été utilisé avec succès en Afrique de l'Ouest et aux États-Unis est donné dans Halbleib & Jepso (2016).

3.2.3. Pratiques suggérées en matière d'atténuation de risques

3.2.3.1. Atténuation des risques pour la vie aquatique

Utiliser une zone tampon autour des écosystèmes lacustres (lacs, étangs, et écosystèmes du bassin xérique), des écosystèmes fluviaux (lotique), des milieux humides (marécages, marais, prairies humides et tourbières) et des zones côtières. Établir des barrières végétatives et / ou utiliser d'autres mécanismes efficaces pour réduire les dérives. Les distances ci-dessous indiquent la largeur de la zone tampon entre les cultures traitées aux pesticides et les écosystèmes aquatiques:

- a) 5 mètres s'ils sont appliqués par des pulvérisateurs à dos.
- b) 10 mètres s'ils sont appliqués par des pulvérisateurs motorisés ou par des rampes de pulvérisation.

Suggestions de barrières végétatives:

- a) Les barrières doivent être aussi hautes que la hauteur de la plante, ou la hauteur des buses de pulvérisation au-dessus du sol, suivant celui qui a un niveau le plus bas.
- b) Les barrières devraient être composées de plantes qui maintiennent leur feuillage toute l'année, mais qui sont perméables à la circulation de l'air, permettant ainsi aux feuilles et aux branches de capter des gouttes de pesticides.

3.2.3.2. Atténuation des risques pour les animaux sauvages ou domestiques

Ne pas appliquer les pesticides à moins de 30 mètres de l'habitat naturel ou des plantes non-cultivées ; empêcher les animaux domestiques, la volaille et les mammifères d'accéder au site après traitement ; et ne pas utiliser les résidus de culture pour l'alimentation des animaux pendant au moins trois semaines après la pulvérisation des pesticides.

3.2.3.3. Atténuation des risques pour les pollinisateurs

- a) Utiliser des pesticides moins toxiques pour les abeilles, si disponibles.
- b) Délimiter une zone tampon autour des écosystèmes naturels, établir des barrières végétatives ou utiliser d'autres mécanismes efficaces pour réduire la dérive des pesticides.
- c) N'appliquer les pesticides que lorsque les insectes pollinisateurs ne sont pas actifs ou après que les fleurs qui attirent des pollinisateurs d'insectes sont gérées comme suit:
 - i. Les substances ne doivent pas être appliquées lorsque les mauvaises herbes fleurissent, ou jusqu'à ce que les mauvaises herbes en fleurs ne soient enlevées par d'autres moyens.
 - ii. La plante n'est pas au pic de la floraison ni au maximum de son attractivité pour les abeilles (*par ex.*, comme une source de miellat produit par les aphides ou d'eau potable disponible).
- d) Lorsque les ruches d'abeilles sont utilisées, les couvrir temporairement pendant la pulvérisation des pesticides et fournir aux abeilles une source d'eau potable à l'extérieur de la zone traitée.

3.2.3.4. Atténuation des risques pour les passants

Utiliser des drapeaux ou des panneaux pour indiquer les champs qui ont été pulvérisés et empêcher les femmes et les enfants d'accéder aux champs pendant au moins une semaine après la pulvérisation. Les hommes adultes devraient éviter d'entrer dans les champs pendant au moins cinq jours après la pulvérisation des pesticides. Un EPI comprenant un masque respiratoire (avec une cartouche filtrante de vapeur organique muni de n'importe quel préfiltre de série N, R, P ou 100), devrait être porté au moment de la pulvérisation s'il est disponible.

3.2.3.5. Atténuation des risques pour les ennemis naturels

Les pesticides toxiques pour les ennemis naturels ne devraient pas être utilisés aux premiers stades de développement des cultures (voir le guide initial de la gestion intégrée des ravageurs / gestion des risques liés à l'utilisation des pesticides à la Section 2.2). Leur utilisation pourrait être minimisée par une seule pulvérisation ciblée dans les zones à forte infestation dans le champ. Les pulvérisateurs doivent être calibrés pour s'assurer que les doses excessives ne sont pas appliquées.

ATTENTION LE CLASSEMENT DES PESTICIDES DANS LE TABLEAU CI-DESSOUS N'IMPLIQUE AUCUNE RECOMMANDATION. Les pesticides énumérés ici sont connus pour être utilisés dans la lutte contre les chenilles légionnaires d'automne. Le tableau propose une évaluation des risques potentiels posés par les pesticides, sur la base des critères détaillés dans le chapitre et reflétés dans les titres des colonnes.

Table 2. Classification des risques et des dangers liés aux pesticides utilisés contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique².

Le rouge (avec des lignes diagonales noires) renvoie aux «pesticides extrêmement dangereux», tels que désignés par la Classification des pesticides par risque recommandée par l'OMS, le Système Général Harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH), les Conventions de Rotterdam ou de Stockholm, le Protocole de Montréal ou les preuves d'effets sanitaires ou environnementaux exceptionnels ; l'orange (avec des points noirs) indique là où l'atténuation des risques est nécessaire pour éviter les effets indésirables. La colonne intitulée «étiqueter pour être utilisé dans (#) pays africains» indique le nombre de pays africains qui approuvent le pesticide répertorié pour son usage contre la chenille légionnaire d'automne. Notez que les auteurs ne fournissent ni de recommandations pour l'utilisation de ces pesticides ni des suggestions quant à leur compatibilité avec la lutte intégrée contre le ravageur.

Substance active	Etiqueter pour être utilisé dans (#) pays africains	Critère pesticides extrêmement dangereux	Atténuation pour la vie aquatique	Atténuation pour les animaux	Atténuation pour les pollinisateurs	Atténuation de l'ingestion par les passants	Toxicité pour les ennemis naturels
Abamectine	1		•••••		•••••		•••••
Acéphate	3			•••••	•••••		•••••
Benfuracarbe		Risque non encore évalué par ce processus					•••••
Carbaryl	1		•••••	•••••	•••••		•••••
Carbosulfane	1	STOCK OBSOLÈTE	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /
Chlorpyrifos	7		•••••	•••••	•••••	•••••	•••••
Cyfluthrine		/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /
Cyperméthrine	7		•••••		•••••		•••••
Diazinon	1		•••••	•••••	•••••	•••••	•••••
Endosulfan		/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /
Imidaclopride	3		•••••		•••••		•••••
Lambda-cyhalothrine	5		•••••		•••••		•••••
Methomyl		/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /
Méthyl parathion	1	STOCK OBSOLÈTE	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /	/ / / / /
Profenofos	1	Risque non encore évalué par ce processus					•••••
Zeta-cyperméthrine	1		•••••		•••••		•••••

² <http://www.fao.org/3/i8320EN/i8320en.pdf>

ATTENTION LE CLASSEMENT DES PESTICIDES DANS LE TABLEAU CI-DESSOUS N'IMPLIQUE AUCUNE RECOMMANDATION. Les pesticides énumérés ici sont connus pour être utilisés dans la lutte contre les chenilles légionnaires d'automne. Le tableau propose une évaluation des risques potentiels posés par les pesticides, sur la base des critères détaillés dans le chapitre et reflétés dans les titres des colonnes.

Tableau 3. Classification des pesticides par danger et par risque non énumérés ci-dessus dont l'utilisation contre les chenilles légionnaires d'automne est recommandée dans les Amériques³.

Le rouge (avec des lignes diagonales noires) fait référence aux «pesticides extrêmement dangereux», tels que désignés par la classification des pesticides par risque recommandée par l'OMS, le Système Général Harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH), les Conventions de Rotterdam ou de Stockholm, le Protocole de Montréal ou les preuves d'effets sanitaires ou environnementaux exceptionnels ; l'orange (avec des points noirs) indique là où l'atténuation des risques est nécessaire pour éviter les effets indésirables. Le jaune (hachuré en blanc) indique que les pesticides énumérés ne présentent pas de risque à des taux de pulvérisation communément utilisés, mais seulement en utilisant les critères énumérés ci-dessus. Les risques sur les ennemis naturels n'ont pas encore été évalués pour ces pesticides. La colonne intitulée «étiqueter pour être utilisé dans (#) pays africains» indique le nombre de pays africains qui approuvent le pesticide répertorié pour son usage contre la chenille légionnaire d'automne. Notez que les auteurs ne fournissent ni de recommandations pour l'utilisation de ces pesticides ni des suggestions quant à leur compatibilité avec la lutte intégrée contre le ravageur.

Substance active	Etiqueter pour être utilisé dans (#) pays africains	Critère de pesticides extrêmement dangereux	Atténuation pour la vie aquatique	Atténuation pour les animaux	Atténuation pour les pollinisateurs	Atténuation de l'ingestion par les passants
Acétamipride	1		Orange avec points noirs			
Alpha-cyperméthrine	1		Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Azadiractine	2		Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
<i>Bacillus thuringiensis</i>	2		Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
<i>Beauveria bassiana</i>	1		Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
Beta-cyfluthrin	1	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales
Béta-cyperméthrine			Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Bifenthrine	1		Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Chlorantraniliprole	2		Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
Chlorfénapyr	1		Risque non encore évalué par ce processus			
Chlorfluazuron	1		Risque non encore évalué par ce processus			
Chromafénozide			Risque non encore évalué par ce processus			
Cyantraniliprole	1		Risque non encore évalué par ce processus			
Deltaméthrine	3		Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Diflubenzuron	1		Orange avec points noirs	Orange avec points noirs		
Diméthoate	2		Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	Orange avec points noirs
Benzoate d'émamectine	2		Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Esfenvalérate	1		Orange avec points noirs		Orange avec points noirs	
Éthyle palmitate	1		Risque non encore évalué par ce processus			
Etofenprox			Risque non encore évalué par ce processus			
Fénitrothion	1			Orange avec points noirs		
Fenpropathrine			Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	
Flubendiamide	2		Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
Gamma-cyhalothrine			Orange avec points noirs			
Indoxacarbe	3				Orange avec points noirs	
Lufénuron	2		Risque non encore évalué par ce processus			
Malathion	2				Orange avec points noirs	
Maltodextrine			Risque non encore évalué par ce processus			
Méthamidophos		Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales	Rouge avec diagonales
Méthoxyfénozide			Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré	Jaune hachuré
Novaluron			Orange avec points noirs			
Perméthrine	1		Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	Orange avec points noirs	
Phenthoate			Risque non encore évalué par ce processus			
Pyrethrum	1				Orange avec points noirs	

³ www.invasive-species.org/fawevidencenote, pg. 94

Substance active	Etiqueter pour être utilisé dans (#) pays africains	Critère de pesticides extrêmement dangereux	Atténuation pour la vie aquatique	Atténuation pour les animaux sauvages	Atténuation pour les pollinisateurs	Atténuation de l'ingestion pour les passants
Spinetoram						
Spinosad	2					
Soufre						
Tébufenozide						
Téflubenzuron		Risque non encore évalué par ce processus				
Thiacloprid						
Thiaméthoxame	3					
Thiodicarb						
Trichlorfon						
Triflumuron	1	Risque non encore évalué par ce processus				

3.3. Communication sur les risques liés aux pesticides

La communication des impacts des pesticides sur la santé nécessite une expertise considérable (BgVV 2000, OCDE 2002). Des versions ultérieures de ce chapitre et d'autres publications fourniront des conseils sur la communication des risques et la formation des agriculteurs en relation avec les pesticides utilisés dans la lutte contre les chenilles légionnaires d'automne. Le fait qu'un pesticide figure sur la liste de la FAO / OMS comme étant extrêmement dangereux est une indication crédible sur l'impossibilité à maîtriser ses risques. Une procédure de communication des risques plus spécifique sera développée au fur et à mesure que l'expérience sur les fortes attaques des chenilles légionnaires d'automne se développera.

3.3.1. Note de synthèse sur la communication: exposition prénatale aux pesticides

Il a été démontré que l'exposition prénatale aux pesticides organophosphorés (OP) a des effets indésirables sur le système nerveux d'un bébé, notamment [a] une réduction du QI, spécifiquement suite à l'exposition au chlorpyrifos (réf. 1) et des produits issus de la dégradation qui sont communs à de nombreux autres pesticides organophosphorés (réf. 2) ; [b] un ralentissement du développement mental et des symptômes de problèmes insidieux de développement à 24 mois d'âge (réf. 3) ; et [c] une diminution de la durée de la grossesse (réf. 4).

1. Rauh *et al.* (2011) *Environ Health Perspectives* 119(8): 1196-1201.
2. Bouchard *et al.* (2011) *Environ Health Perspectives* 119(8): 1189-1195.
3. Eskanazi *et al.* (2007) *Environ Health Perspectives* 115(5): 792-798.
4. Eskanazi *et al.* (2004) *Environ Health Perspectives* 112(10): 1116-1124.

Ces références peuvent être téléchargées sur le lien: <http://ehp.niehs.nih.gov/>.

3.3.2. Note de synthèse sur la communication: Intoxication grave par des pesticides

Une exposition extrême aux pesticides peut entraîner une intoxication aiguë aux pesticides, qui est une maladie ou un effet sur la santé résultant de l'exposition et se développant habituellement dans les 48 heures. Les symptômes exacts et les systèmes affectés au niveau de l'organisme varient selon le type et la quantité de pesticide (Figure 2). Les insecticides carbamates tels que le Méthomyl, le carbaryl et le carbofuran et les pesticides organophosphorés comme le chlorpyrifos, le méthamidophos, le diazinon, et le diméthoate ont de graves effets sur le système nerveux. Des insecticides de la classe des pyréthrinoides tels que la deltaméthrine, la zéta-cyperméthrine, la cyfluthrine et la lambda-cyhalothrine peuvent avoir des effets graves sur le système nerveux, mais ils sont moins toxiques que les carbamates et les organophosphorés.

Les cas présumés d'intoxication peuvent être examinés par des professionnels médicaux, des toxicologues, ou des experts en pesticides, et attribués aux pesticides suivant les directives de l'OMS ci-dessous: Thundiyil *et al.* (2008). *Bulletin de l'OMS* 86 (3): 205-209. <http://www.who.int/bulletin/volumes/86/3/07-041814/en/>.

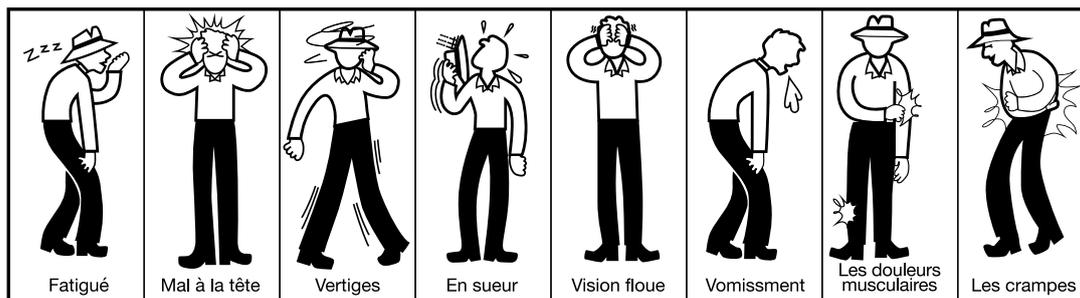


Figure 2. Graphique utilisé pour l'éducation sur les pesticides en Afrique de l'Ouest - Effets de l'intoxication aiguë aux pesticides.

4. Conclusions

La science et la technologie nécessaires pour appliquer les pesticides en toute sécurité sont beaucoup plus complexes que beaucoup ne le croient. L'utilisateur final (à savoir la personne qui pulvérise le pesticide) détermine dans une large mesure si un traitement fait à base de pesticides sera efficace ou non, ainsi que le degré d'exposition à des risques inutiles des espèces non cibles, y compris les êtres humains. Cependant, très souvent, les épandeurs manquent des fois de compétences de base non seulement dans l'entretien du pulvérisateur, son calibrage et son utilisation sur le terrain, mais aussi dans le choix des pesticides à appliquer et comment les appliquer. Il leur manque des informations cruciales, y compris des étiquettes supposées donner des informations sur les risques sanitaires liés aux produits, le volume et les taux d'épandage, les restrictions d'entrées dans le champ et même des informations sur la toxicité pour les espèces bénéfiques. Aussi, les étiquettes des pesticides ne font généralement référence qu'à des risques tels que l'intervalle avant la récolte (PHI), et même dans les cas où elles y font référence, elles supposent que des EPI entièrement de bonne qualité et efficaces sont disponibles, ce qui est rarement le cas en Afrique. Pour résoudre ce problème, il faut un guide complet, basé sur les besoins, localement applicable dans différentes zones et contenant des données actuellement manquantes dans d'autres documents. Bien que ce guide soit en préparation, il est important que les épandeurs respectent au moins les réglementations sur les pesticides au niveau national. Les pays réglementent les pesticides et leurs utilisations (y compris les cultures et les ravageurs) ainsi que les exigences à remplir par l'utilisateur vis-à-vis de l'utilisation de chaque produit.

La conformité à la réglementation en vigueur est une étape qui peut contribuer à réduire les risques et également à des traitements plus efficaces. Bien que les exigences relatives aux étiquettes sur les pesticides et le nombre de formations dispensées aux épandeurs varient en fonction des pays, cette mesure constitue un point de départ commun qui sera largement soutenu. Il n'existe actuellement aucun manuel d'épandage de pesticides couvrant l'ensemble des juridictions en Afrique et leurs besoins. Notre projet est de produire un manuel dans un proche avenir pour combler cette lacune. Pour le moment, nous conseillons aux épandeurs de se conformer aux directives sur l'étiquette du pesticide qu'ils utilisent et de consulter l'agence spécifique en charge de la recommandation des pesticides dans le pays.

Nous avons délibérément incorporé la lutte intégrée contre les ravageurs et la Gestion des risques liés aux pesticides (PRM) pour deux raisons: (1) ces deux éléments font partie du concept de base de la lutte intégrée contre le ravageur qui ont été vérifiés et entièrement testés; (2) parce que les pesticides peuvent faire obstacle à l'adoption de la lutte intégrée contre les ravageurs par des impacts involontaires sur la santé humaine et environnementale. Notre résumé sur les produits extrêmement dangereux et les pesticides nécessitant une atténuation supplémentaire des risques devrait contribuer à une sélection plus efficace des pesticides. Au moment de la rédaction de ce manuel, plusieurs initiatives sont en cours pour obtenir des données supplémentaires pouvant favoriser l'adoption de meilleures et durables pratiques de lutte intégrée contre le ravageur. Cela inclut les efforts déployés par certaines entreprises pour identifier de nouveaux produits chimiques à faible risque et efficaces qui pourraient être compatibles avec la lutte intégrée contre le ravageur.

En ce qui concerne les pesticides de synthèse et les bio-pesticides, il est essentiel qu'un certain nombre d'expériences rigoureusement menées fournissent des données sur l'efficacité à différents stades de croissance du maïs et à différents stades de développement des chenilles légionnaires d'automne. Sans ces données, il sera difficile de mettre au point des options locales, à faible risque et rentables pour les producteurs.

Enfin, la communication sur les risques liés aux pesticides doit être prise au sérieux, compte tenu des préoccupations que nous avons exprimées plus haut au sujet de leurs effets potentiels sur la santé des petits producteurs de maïs. Les données sur l'atténuation des dangers et des risques liés à l'utilisation des pesticides que nous fournissons sont scientifiquement fondées et ont fait l'objet d'un très large examen par les pairs à l'échelle internationale. Ces informations peuvent guider les gouvernements et les agences dans l'achat de stocks de pesticides en cas d'urgence, et peuvent aider à éviter certains des coûts d'utilisation des pesticides dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée contre le ravageur. Elles peuvent également renseigner les consultants, les éducateurs et les chercheurs de lutte intégrée contre le ravageur sur les propriétés de certains pesticides qui sont actuellement utilisés contre les chenilles légionnaires d'automne. Toutefois, il existe encore un besoin en matériels de sensibilisation destinés à soutenir les décisions prises par des producteurs qui ne seraient pas conscients de l'éventail de dangers et de risques posés par les pesticides utilisés actuellement.

Limitations/domaines de recherche

1. Surmonter les obstacles à l'adoption d'une lutte intégrée contre le ravageur qui intégrerait l'utilisation des pesticides si nécessaire en:
 - a. Utilisant les tableaux de compatibilité de lutte intégrée contre le ravageur pour examiner et comparer les pesticides candidats à l'utilisation contre les chenilles légionnaires d'automne.
 - b. Réalisant des essais d'évaluation des pesticides rigoureusement conçus qui, par leur conception et leur ampleur, vont permettre une comparaison rigoureuse et réaliste des pesticides. Inclure à la fois un contrôle positif (un produit standard connue pour son efficacité) pour valider les conditions d'essai et les contrôles négatifs (parcelles traitées à l'eau et sans traitement) comme base de discrimination statistique des résultats. Collecter les données sur les ennemis naturels ainsi que les ravageurs pendant toute la saison, et minimiser les effets de bordures qui se produisent lorsque les ennemis naturels migrent des parcelles non traitées vers les parcelles traitées de pesticides à large spectre et améliorer artificiellement leur efficacité.
 - c. Effectuant un suivi sur l'ensemble du champ sur des candidats probables de pesticides à recommander pour s'assurer que l'efficacité des expériences se traduit au niveau du champ.
 - d. Elaborant des paramètres d'application et des programmes de formation adaptés aux pulvérisateurs utilisés, ainsi qu'aux connaissances et compétences des producteurs afin de maximiser l'exposition, le ciblage et l'efficacité contre les ravageurs.
 - e. Se concentrant particulièrement sur le calibrage, les doses à appliquer à différentes stades phenologiques et les additifs susceptibles d'accroître l'efficacité en maximisant la couverture et la rétention.
 - f. Effectuant des essais tout au long de la zone d'infestation afin d'évaluer les traits ultérieurs et les niveaux de résistance aux pesticides des chenilles légionnaires d'automne, et en faisant le suivi de tout changement au fil du temps. Utiliser ceci comme base pour la conception des programmes de gestion de la résistance aux pesticides qui sont mis en œuvre au travers des formations et évaluations efficaces.
 - g. Testant tous les pesticides potentiellement toxiques sur les principaux ennemis naturels associés aux ravageurs de maïs.
2. Elaborer des programmes d'éducation efficaces pour l'adoption de la lutte intégrée contre le ravageur qui placent les pesticides dans un contexte de la lutte intégrée contre le ravageur.
3. Surveiller les effets aigus et chroniques des pesticides sur la santé et ses impacts environnementaux pour assurer un juste équilibre entre les risques et les avantages associés à leur utilisation.
4. Intégrer les économistes et les spécialistes des sciences sociales au sein de ce programme de recherche afin d'assurer que les données de recherche respectent une bonne éthique.

Messages clés aux décideurs

Pesticides très dangereux

1. Mettre en oeuvre des politiques pour l'élimination des pesticides extrêmement dangereux sur les marchés formels et informels.
2. Améliorer l'étiquetage des pesticides très toxiques pour expliquer les risques qui y sont associés, en particulier pour les manutentionnaires et les épandeurs, et prévoir des restrictions en termes d'accès au site traité par les travailleurs qui tiennent compte du fait qu'ils pourraient ne pas avoir d'EPI.
3. Mettre en oeuvre des politiques établissant les processus et les voies d'information pour la collecte et l'utilisation de données médicales recueillies sur le terrain concernant les effets aigus et chroniques des pesticides.
4. Faire en sorte que les Signes et les symptômes d'empoisonnement des pesticides fassent partie de l'éducation et de la formation du personnel médical, et établir des systèmes nationaux de collecte et de déclaration des données relatifs à la toxicité aux organismes de régulation qui en tiennent compte pendant l'examen du service après vente des produits enregistrés.
5. Établir un marché pour l'EPI, et élaborer des programmes d'éducation qui permettent de comprendre la nécessité et l'importance de conserver un EPI efficace pour les manutentionnaires et les épandeurs.

Compatibilité avec la lute intégrée contre le ravageur

6. Établir un processus visant à considérer la compatibilité avec la lute intégrée contre le ravageur comme un critère d'enregistrement des pesticides et qui exige des autorités de régulation et des services de protection des cultures qu'ils collaborent pour s'assurer que les recommandations sur les pesticides sont réalistes, pratiques et à faible risque.



CHAPITRE 04

Résistances variétales à la chenille légionnaire d'automne

Auteurs: B.M. Prasanna, CIMMYT-Kenya ; Anani Bruce, CIMMYT-Kenya ; Stephan Winter, Institut Leibniz DSMZ, Allemagne ; Michael Otim, NARO, Ouganda ; Godfrey Asea, NARO, Ouganda ; Subramanian Sevgan, ICIPE, Kenya ; Malick Ba, ICRISAT, Niger ; Johnnie van den Berg, Université du Nord-Ouest, Afrique du Sud ; Robert Beiriger, Université de Floride, États-Unis ; Lilian Gichuru, AGRA, Kenya ; Walter Trevisan, GEM, États-Unis ; Paul Williams, USDA-ARS, Mississippi, États-Unis ; Sylvester Oikeh, AATF, Kenya ; Mark Edge, Monsanto, États-Unis ; Joseph E. Huesing, USAID, États-Unis ; et Tracy Powell, USAID, États-Unis.

1. Introduction

L'élaboration et le déploiement d'une résistance variétale est l'un des piliers d'une stratégie efficace de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne. La résistance variétale est particulièrement nécessaire dans le contexte africain, où la majorité des producteurs sont de petits producteurs agricoles ayant un accès limité à des moyens sûrs et abordables pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne.

Afin de faciliter le déploiement de la résistance variétale comme une des composantes de la lutte intégrée visant à contrôler la chenille légionnaire d'automne en Afrique, ce chapitre fournit:

- a. Des informations générales / contextuelles sur les sources du germoplasme d'origine et transgénique susceptibles d'offrir une résistance à la chenille légionnaire d'automne.
- b. Des protocoles d'élevage de la chenille légionnaire d'automne et d'infestation artificielle.
- c. Un protocole harmonisé de sélection et d'évaluation du germoplasme, fiable et efficace.

Dans le traitement de chacun de ces sujets clés, ce chapitre met l'accent sur les connaissances pratiques visant à accélérer les efforts déployés par les sélectionneurs de semences pour identifier, évaluer et intégrer les caractères de résistance à la chenille légionnaire d'automne dans les antécédents génétiques du maïs adaptés à la culture en Afrique subsaharienne.

2. Sources de variation génétique pour la résistance variétale à la chenille légionnaire d'automne

Historiquement, des efforts considérables de sélection génétique ont été déployés dans les Amériques sur la résistance à la chenille légionnaire d'automne, en particulier au niveau du maïs. Des efforts similaires n'ont été entrepris en Afrique que récemment suite à l'identification de la chenille légionnaire d'automne sur le continent en 2016 (Georgen *et al.* 2016)¹. Par conséquent, **il n'existe actuellement aucun cultivar de maïs avec une résistance scientifiquement validée contre la chenille légionnaire d'automne adapté à l'Afrique**. Pour combler cette lacune, CIMMYT a accéléré les efforts visant à sélectionner rigoureusement les lignées pures de maïs, les hybrides pré-commerciaux et commerciaux et à améliorer les variétés à pollinisation libre (VPL) sous l'infestation artificielle de la chenille légionnaire d'automne. Les premiers résultats sont attendus en 2018 et seront communiqués à travers différents canaux, dont les éditions futures de ce manuel. Une fois disponibles, ces données indiqueront le degré de résistance à la chenille légionnaire d'automne trouvées dans les variétés de maïs africaines actuellement disponibles et du germoplasme du maïs (sub) tropical. En retour, cette information éclairera à la fois les recommandations du secteur public et du secteur privé sur les hybrides et les variétés à déployer, ainsi que la sélection du meilleur germoplasme par les sélectionneurs pour un développement variétal ultérieur.

Au regard de l'absence de preuves pouvant éclairer les recommandations concernant les variétés de maïs résistantes à la chenille légionnaire d'automne actuellement disponibles et adaptées à l'Afrique subsaharienne, ce chapitre portera plutôt sur la fourniture de renseignements et d'outils aux sélectionneurs de maïs afin de faciliter le dépistage et l'identification du germoplasme résistant à la chenille légionnaire d'automne. Cela permettra de soutenir la mise en œuvre de la sélection de la résistance à la chenille légionnaire d'automne comme partie intégrante des programmes d'amélioration du maïs en Afrique.

La résistance du maïs à la chenille légionnaire d'automne, et en fait à d'autres lépidoptères ravageurs, varie selon un continuum. Les réponses du germoplasme du maïs sous l'infestation de la chenille légionnaire d'automne sont mesurées sur l'échelle de Davis (Davis et Williams 1992), qui évalue l'ampleur des dommages foliaires ou des dégâts sur l'épi par rapport à un contrôle sensible sur une échelle de 1 à 9 (expliquée en détail à la Section 3 du présent chapitre). Les réponses peuvent aller de «très résistantes» (avec une note de 1) à «hautement sensibles» (avec une note de 8 à 9).

Dans ce spectre de susceptibilité et de résistance, plusieurs sources de variations génétiques utiles ont été identifiées qui peuvent fournir du matériel génétique aux sélectionneurs de semences cherchant à améliorer la résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le germoplasme du maïs (sub) tropical et adapté à l'Afrique.

¹ Tout au long du chapitre, nous discutons de la résistance des plantes-hôtes à la chenille légionnaire d'automne en utilisant le maïs comme exemple, étant donné que des travaux considérables ont déjà été effectués sur le maïs. Toutefois, les principes demeurent les mêmes pour la résistance des plantes-hôtes dans d'autres cultures annuelles (p. ex., sorgho, millets) - bien que les protocoles puissent nécessiter une modification selon les espèces.

La résistance naturelle ou «native» a été identifiée dans plusieurs lignées /populations / pures et variétés hybrides de maïs, surtout dans les Amériques, où ce caractère a été incorporé depuis longtemps dans les programmes de sélection conventionnelles (décrits à la Section 2.1). La plupart des résistances naturelles du maïs sont polygéniques (basées sur plusieurs gènes) et de nature quantitative, conférant une «résistance partielle». Ainsi, les variétés de maïs présentant une résistance naturelle affichent généralement des scores en se basant sur l'échelle de Davis est de 3 à 5 lorsqu'elles sont soumises à la chenille légionnaire d'automne.

En plus de cette variation génétique naturelle, au cours des deux dernières décennies, certains pays des Amériques ont choisi d'utiliser la résistance transgénique aux insectes pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne (décrite à la Section 2.2). Bien que de tels produits soient confrontés à d'autres obstacles réglementaires, politiques et à l'acceptation des consommateurs, les variétés de maïs portant des transgènes spécifiques aux lépidoptères offrent généralement une protection significative contre la chenille légionnaire d'automne, enregistrant systématiquement des scores en se basant sur l'échelle de Davis est de 1 à 2.

Lors de la conception d'une stratégie d'amélioration des cultures afin d'introduire des caractères de résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le germoplasme de l'élite adaptée à l'Afrique, les sélectionneurs de semence devraient considérer non seulement la source et la force de la résistance à la chenille légionnaire d'automne, mais également la durabilité potentielle de la résistance. Les ravageurs tels que la chenille légionnaire d'automne peuvent évoluer pour surmonter la résistance monogénique (basée sur un seul gène) ou oligogéniques (basée sur quelques gènes), comme cela a été démontré en particulier dans les variétés transgéniques (Huang *et al.* 2014). Les efforts de sélection contre les ravageurs sont donc un processus continu, sans «ligne d'arrivée» d'une course perpétuelle entre l'hôte et le ravageur en évolution. En règle générale, les programmes d'élevage devraient chercher à identifier, à utiliser et au final, à combiner des caractères de résistance multiples - qu'ils soient conventionnels ou qu'ils soient approuvés pour une utilisation - transgénique, afin d'améliorer la durabilité de la résistance variétale.

2.1. Variation génétique naturelle pour la résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le maïs

Les études sur la résistance aux insectes du maïs ont commencé dans les années 1900, lorsque Hinds (1914) a démontré la résistance partielle du germoplasme du maïs à l'*Helicoverpa zea* (Boddie), et que Gernert (1917) a démontré la résistance partielle au puceron foliaire du maïs *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) dans la téosinte x du maïs hybride jaune denté aux États-Unis. Les premières variétés de maïs à résistance partielle à la pyrale européenne du maïs, *Ostrinia nubilalis* (Hübner), ont été développées par Huber *et al.* (1928), tandis que le germoplasme avec une résistance partielle à la mineuse de la canne à sucre, *Diatraea saccharalis* (Fabricius), a été identifié dans les années 1970 (Elias 1970 ; Peairs 1977).

S'appuyant sur ces travaux et d'autres, au cours des années 1970 à 1990, la recherche menée par CIMMYT au Mexique, par Embrapa au Brésil, par l'USDA-ARS (Mississippi) et par certaines universités américaines a permis d'identifier et de développer un certain nombre de lignées de maïs tropicales/subtropicales améliorées, avec une résistance au moins partielle à la chenille légionnaire d'automne (Tableau 1).

Bien que le germoplasme résistant à la chenille légionnaire d'automne ait été développé au Mexique, aux États-Unis et au Brésil, la diversité des variétés résistantes identifiées indique qu'il existe de nombreux caractères conventionnels pour appuyer une stratégie de sélection à moyen et à long terme visant à incorporer la résistance à la chenille légionnaire d'automne dans l'élite génétique du maïs adapté à l'Afrique. Certaines de ces sources de résistance aux insectes dans le maïs ont été spécifiquement testées pour la résistance à la chenille légionnaire d'automne, tandis que d'autres ont été testées pour résister à d'autres ravageurs, mais elles ont un potentiel de résistance à la chenille légionnaire d'automne, comme le démontrent les études effectuées au Mississippi.

Le germoplasme avec une résistance naturelle à la chenille légionnaire d'automne décrit dans cette section, ensemble avec des lignées de maïs adaptées à l'Afrique, des hybrides pré-commerciaux et commerciaux, et des variétés à pollinisation libre (VPL), sont actuellement évalués par CIMMYT contre les populations de chenille légionnaire d'automne en Afrique pour valider et/ou identifier de nouvelles sources de résistance dans le contexte africain. L'Institut International de l'Agriculture Tropicale (IITA) en Afrique de l'Ouest a également initié une sélection traditionnelle du maïs pour sa résistance à la chenille légionnaire d'automne. Au fur et à mesure que les résultats de ces essais émergents et que des sources de résistance validées sont trouvées, CIMMYT et l'IITA, de concert avec des partenaires publics et privés nationaux et régionaux, veilleront à ce que les informations et le germoplasme résistant soient diffusés automatiquement. En fin de compte, la communauté africaine de sélectionneurs du maïs doit déployer des efforts coordonnés et intensifs pour développer des produits d'élite qui combinent la résistance à la chenille légionnaire d'automne avec d'autres caractères désirables et pertinents pour les petits producteurs agricoles.

Tableau 1. Quelques sources potentielles de résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le germoplasme du maïs identifiées ou développées par les programmes de sélection du maïs dans les Amériques.

Germoplasme	Description	Références
Pop. 304 ; Pop. 392 ; Pop. FAW-CGA ; Pop. FAW-Tuxpeno ; Pop. FAW-Non- Tuxpeno	Les populations reproductrices de maïs développées et utilisées par CIMMYT comme sources de dérivation de plusieurs CML (Lignée de maïs de CIMMYT) avec une résistance partielle à la chenille légionnaire d'automne au Mexique.	Ortega <i>et al.</i> (1980) ; Mihm (1997)
Mp496 ; Mp701 ; Mp702, Mp703 ; Mp704 ; Mp705, Mp706 ; Mp707 ; Mp708, Mp713 ; Mp714 ; Mp716	Les lignées pures de maïs tempéré avec résistance à la chenille légionnaire d'automne ont été développées aux États-Unis par USDA-ARS (Mississippi). Parmi celles-ci, Mp496, et Mp701 à Mp708, ont été dérivées des accessions des Caraïbes – Antigua Gp1, Antigua Gp2D, Guadeloupe Gp1A, et République dominicaine Gp1. Mp713 et Mp714 ont été développés par CIMMYT à partir des populations multiples résistantes aux insectes.	Scott et Davis (1981) ; Scott <i>et al.</i> (1982) ; Williams et Davis (1980, 1982, 1984, 2000, 2002) ; Williams <i>et al.</i> (1990)
B49 ; B52 ; B64 ; B68 ; B96	Les lignées pures tolérant à la pyrale du maïs générées par l'Université d'État de l'Iowa, aux États-Unis, à travers l'introgression du Maïs venant d'Amargo de l'Argentine dans le maïs tempéré. La plus importante lignée pure parmi ces dernières fut la B68, qui est devenue largement utilisée par l'industrie des semences aux États-Unis.	Walter Trevisan, communication personnelle
CML121 à CML127	Les lignées pures résistant aux insectes (CML) dérivées mises au point par CIMMYT au Mexique, en utilisant le germoplasme de l'USDA-ARS (Mississippi).	Gerdes <i>et al.</i> (1993)
Trois améliorations du matériel génétique du maïs pures	Les dérivés de l'introgression du germoplasme de l'Uruguay, de Cuba, et de la Thaïlande ; ont montré une certaine résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le Sud des États-Unis.	Ni <i>et al.</i> (2014)
CMS14C ; CMS23 (Antigua x République dominicaine) ; CMS24 ; MIRT (Résistance multiple aux insectes tropicaux) race <i>Zapalote Chico, Sintetico Spodoptera, Caatingueiro Spodoptera, et Assum Preto Spodoptera</i>	Depuis 1975, Embrapa-Brésil identifie et décrit plusieurs sources de résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le maïs, tout en examinant les composés chimiques qui sous-tendent cette résistance indigène	Walter Trevisan, communication personnelle
Lignées de maïs brésiliennes avec résistance potentielle à la chenille légionnaire d'automne	Dans les travaux menés de 1986 à 1993, Embrapa-Brésil a identifié des sources potentielles de résistance à la chenille légionnaire d'automne basée sur l'évaluation des accessions du maïs dans la banque de germoplasme brésilienne.	Viana et Guimares (1997)

Note: Pour plus d'informations sur les sources de résistance du germoplasme du maïs de CIMMYT, veuillez contacter B.M. Prasanna (b.m.prasanna@cgiar.org) ; pour les sources de résistance à la chenille légionnaire d'automne du germoplasme du maïs de l' USDA-ARS (Mississippi), veuillez contacter Paul Williams (Paul.Williams@ars.usda.gov) ; pour les sources de résistance du germoplasme du maïs Embrapa , veuillez contacter avec Sidney Parentoni (cnpms.chpd@embrapa.br).

2.2. Transgénique résistance à la chenille légionnaire d'automne dans le maïs

Le déploiement de variétés de cultures transgéniques ou génétiquement modifiées (GM) exprimant des gènes de résistance aux lépidoptères est une autre stratégie pour contrôler efficacement les dommages causés par la chenille légionnaire d'automne au niveau du maïs. Les premières variétés de maïs GM résistantes à la chenille légionnaire d'automne ont été développées à l'aide des gènes de protéines cristallines insecticides (*Cry*) isolées à partir du *Bacillus thuringiensis* (*Bt*). Leurs caractères sont les mêmes que ceux utilisés par l'industrie des pesticides organiques conventionnels. L'ingestion de la protéine *Cry* est létale pour les larves de nombreuses espèces lépidoptères, notamment la chenille légionnaire d'automne. Plusieurs gènes *Cry* différents sont disponibles – *par ex.* *Cry 1A*, *cry 1Ab* et *Cry 1F* – et ont été déployés dans des variétés commerciales de maïs *Bt* à l'échelle mondiale depuis plus de 20 ans. En outre, le *Bt* produit une autre classe de protéines spécifiques aux lépidoptères appelée « *Vegetative Insecticidal Protein* » (VIP). Ces VIPs sont codés par des gènes *vip*, dont le plus important est le gène *vip3A* utilisé pour conférer une résistance à la chenille légionnaire d'automne. De nombreux hybrides du maïs GM, y compris diverses combinaisons de *Cry* et de gènes *vip*, sont commercialisés au Brésil et en Amérique du Nord, où plus de 80% de la superficie totale de maïs est cultivée avec du maïs *Bt* (Horikoshi *et al.* 2016).

Les caractères de résistance transgénique aux insectes confèrent une résistance variétale significativement plus élevée à la chenille légionnaire d'automne que la résistance naturelle. Par exemple, Viana *et al.* (2016) ont comparé le niveau de résistance à la chenille légionnaire d'automne enregistré chez 32 hybrides de maïs conventionnels (obtenues à partir de lignées pures avec une résistance indigène à la chenille légionnaire d'automne) à la résistance de trois hybrides transgéniques *Bt* exprimant les toxines *Cry1F* et *Cry1A.105* + *Cry2Ab2* (2B707Hx, AG8088PRO et DK90PRO). Les six meilleurs hybrides conventionnels avaient des scores selon l'échelle de Davis allant de 2,8 à 4,1, tandis que les trois hybrides *Bt* présentaient un score de 1 ; par contre, le contrôle de l'hybride sensible commercial a montré un score de 7.

En Afrique, le maïs *Bt* n'est actuellement commercialisé qu'en Afrique du Sud, où les autorités de régulation ont supervisé plusieurs approbations, avec plus de 15 ans de déploiement de ces produits. Deux produits GM sont disponibles avec une résistance à la chenille légionnaire d'automne (Base de données d'approbation des OGM de l'ISAAA):

- Le MON 810 « event », destiné à la lutte contre la pyrale du maïs confère également une résistance partielle à la chenille légionnaire d'automne et est cultivé en Afrique du Sud depuis 1997.
- Le MON 89034 « event », qui a démontré son efficacité dans la lutte à la fois contre la chenille légionnaire d'automne et la pyrale du maïs, est cultivé en Afrique du Sud depuis 2010. Le MON 89034 est particulièrement recommandé pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne en raison de son efficacité élevée contre le ravageur, ainsi que de la durabilité anticipée de lutte au fil du temps en raison de l'incorporation des caractères de résistance « empilés » ou « pyramidaux » aux insectes (voir la Section 2.2.1).

Au-delà de l'Afrique du Sud, le « Water Efficient Maize for Africa » (WEMA) - un partenariat public-privé destiné à développer et à diffuser des variétés améliorées de maïs adaptées aux petits producteurs agricoles africains – entreprend actuellement le développement des variétés améliorées de maïs avec une résistance transgénique aux insectes. Dans le cadre du partenariat WEMA, les organisations nationales de recherche agricole de l'Afrique du Sud, du Kenya, de la Tanzanie, de l'Ouganda et du Mozambique sont en train de tester la performance des transgéniques du MON 810 *Bt* et du « Stack » *Bt* +Dt (la tolérance à la sécheresse) par introgression dans des variétés de maïs africaines adaptées localement². Lancé pour la première fois en 2012, ces essais en champs confinés évaluent l'innocuité, l'efficacité et la performance du maïs transgénique dans les conditions africaines, et sont supervisés par des services de réglementation de biosécurité spécifiques à chaque pays.

Les résultats qui se dégagent du projet « WEMA » sont compatibles avec la performance du maïs *Bt* dans d'autres pays: lorsqu'elle est introduite dans des variétés de maïs africaines préférées, le MON 810 « event » démontre un contrôle élevé contre les foreurs de tige et un contrôle partiel des chenilles légionnaires d'automne au Kenya, au Mozambique et en Ouganda. Une demande d'approbation du MON 810 au Kenya est en attente de finalisation, et les demandes d'approbation dans d'autres pays partenaires du projet « WEMA » devraient pouvoir être communiquées en 2018 - donnant aux services africains de réglementation de la biosécurité la possibilité d'évaluer eux-mêmes la technologie et de décider de l'innocuité, de l'efficacité et de la performance du maïs *Bt* dans les environnements africains.

Au-delà de la disponibilité de caractères transgéniques de résistance efficaces contre la chenille légionnaire d'automne dans les efforts d'amélioration génétique du maïs, le projet « WEMA » cherche également à examiner et à traiter des questions plus larges de capacité de réglementation et de gérance africaine pour déployer la biotechnologie de manière appropriée aux petits producteurs agricoles. Dans ce but, les partenaires du projet « WEMA » collaborent avec les organismes de réglementation de la biosécurité afin de renforcer les capacités et l'expertise technique, d'établir des systèmes de réglementation fonctionnels et de répondre aux questions sur la technologie émanant des scientifiques, des décideurs et du grand public. Le projet « WEMA » a également mis à l'essai l'utilisation d'accords de licences exemptes de redevances pour les entreprises semencières en Afrique, dans le but de s'assurer que les variétés transgéniques améliorées sont abordables et accessibles aux petits producteurs agricoles pauvres en Afrique.

² Les essais en champs confinés sont également prévus en Éthiopie.

2.2.1. Gestion de la résistance aux insectes (GRI) au maïs *Bt*

Au fil du temps, les ravageurs peuvent évoluer pour surmonter la résistance variétale, qu'elle soit naturelle ou transgénique. Toutefois, la résistance naturelle est généralement plus durable, à la fois parce qu'elle est généralement de nature quantitative (avec plusieurs gènes sous-jacents à l'expression de la résistance, rendant plus difficile la possibilité pour le ravageur de «fuir» la lutte) et parce qu'elle est généralement moins efficace pour contrôler le ravageur (et par conséquent exerce moins de pression sur le ravageur pour surmonter la résistance variétale). En revanche, la possibilité qu'un insecte ravageur développe par la suite une résistance aux transgènes hautement efficaces utilisés dans les cultures transgéniques est une préoccupation majeure - en particulier pour les variétés transgéniques précoces qui reposent sur l'expression d'un gène unique dominant hautement efficace (tel que le *Cry1Ab* dans le MON810 et le *Bt11*).

Bien qu'une diversité de facteurs biologiques et environnementaux influencent le risque qu'un insecte développe une résistance, la résistance aux insectes apparaît généralement lorsque la pression de sélection sur l'insecte est exceptionnellement élevée - par exemple, un degré élevé de monoculture avec une variété transgénique exprimant un gène de résistance unique, associé à une mise en œuvre inadéquate d'une stratégie de gestion de la résistance aux insectes (GRI).

Le développement de la résistance par la chenille légionnaire d'automne au *Cry1F* au niveau du maïs a été documenté à Porto Rico (Storer *et al.* 2010), au Sud-Est des États-Unis (Huang *et al.* 2014), au Brésil (Farias *et al.* 2014) et en Argentine (Chandrasena *et al.* 2017).

Alors que les premiers produits transgéniques sur le marché étaient forcement basés sur des gènes uniques, une stratégie plus durable repose sur la résistance multigénique. Ceci invoque le principe général selon lequel pour maximiser la durabilité des caractères, les sélectionneurs devraient combiner plusieurs caractères de résistance qui utilisent des mécanismes d'action distincts. Dans le contexte spécifique des cultures transgéniques, cela s'appelle transgènes «empilés» ou «pyramidaux» - s'assurant que deux gènes ou plus, de préférence avec différents types de protéines toxiques ou différents modes d'action (p. ex., *Cry* et *Vip3A*), sont exprimés simultanément dans la plante-hôte à forte dose (Horikoshi *et al.* 2016). Les études menées aux États-Unis et au Brésil suggèrent que pyramider plusieurs transgènes (dans la même plante) est plus efficace en termes de lutte contre la chenille légionnaire d'automne et de GRI qu'une résistance basée sur un seul gène (Huang *et al.* 2014 ; Horikoshi *et al.* 2016). Cela nécessite également l'introgression de différents caractères de résistance transgénique (p. ex. différents gènes *Cry* ou *Cry* + *Vip3A*) dans le génome du maïs qui dispose également d'une résistance naturelle à l'insecte ravageur. Le plus grand avantage de ce type de pyramide est que si le ravageur surmonte le (s) trait (s) de résistance transgénique, la résistance naturelle du matériel génétique conventionnel (même partielle) peut potentiellement atténuer l'infestation jusqu'à ce que de nouvelles variétés plus résistantes soient développées et déployées.

Afin d'assurer un contrôle durable des insectes nuisibles tels que la chenille légionnaire d'automne à travers le déploiement de la technologie de la culture transgénique, les développeurs ont conçu et mis en œuvre des stratégies de GRI (Siegfried *et al.* 2007 ; CropLife, 2012). Ces protocoles standards de l'industrie font en sorte que les meilleures pratiques sont communiquées aux intervenants de manière à assurer la plus large application possible, étant donné que la mise en application de ces pratiques par les producteurs est le facteur atténuant clé pour gérer avec succès la résistance. Un bon plan de GRI varie selon la combinaison des cultures et des ravageurs, mais tient généralement compte des éléments suivants:

- Une surveillance et une détection rigoureuses du développement potentiel de la résistance aux insectes au-delà d'un niveau seuil déterminé avant l'introduction de la culture transgénique.
- L'utilisation de multiples caractères de résistance (conventionnels et transgéniques) exprimés à forte dose.
- L'utilisation d'un «refuge» composé de maïs non-*Bt*, d'une taille et d'une conception adéquate pour supporter une population sensible et suffisante du ravageur cible (par. ex., la chenille légionnaire d'automne).

Le « refuge », aspect essentiel du plan de gestion de la résistance aux insectes assure la disponibilité d'une population suffisante d'insectes sensibles pour s'accoupler avec les quelques insectes résistants susceptibles d'évoluer dans les champs transgéniques cultivés. Cela atténue significativement la fréquence des allèles de résistance dans la population d'insectes, retardant ainsi l'évolution de la résistance des insectes au(x) transgène(s).

Bien que particulièrement important dans le contexte des variétés de maïs génétiquement modifiées, toute variété résistante à la chenille légionnaire d'automne devrait en fin de compte être déployée dans le cadre d'une stratégie plus large de lutte intégrée contre le ravageur (voir Chapitre 1) qui vise à gérer et à atténuer durablement les effets néfastes de l'insecte ravageur.

3. Protocoles pour l'amélioration de la résistance génétique à la chenille légionnaire d'automne

En reconnaissant que la chenille légionnaire d'automne est devenue un ravageur endémique et probablement à long terme sur l'ensemble du continent africain, il est impératif que le CGIAR (autrefois the *Consultative Group for International Agricultural Research*), les programmes nationaux d'amélioration génétique du maïs et du secteur privé entreprennent et maintiennent un réseau solide de produits d'élite qui intègrent la résistance à la chenille légionnaire d'automne à d'autres caractères adaptatifs dans les cultures et qui sont pertinents aux petits producteurs en Afrique subsaharienne. Pour ce faire, les sélectionneurs doivent faire le criblage du germoplasme contre la chenille légionnaire d'automne – un processus nécessitant des quantités adéquates de semences pour la production des plants, un protocole optimal d'élevage de masse afin de fournir suffisamment d'insectes pour le criblage du germoplasme sous infestation artificielle (Section 3.1) et un protocole clair pour évaluer les réponses des « sujets » tests (lignée, variété) (Section 3.2).

3.1. Protocole pour l'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne

3.1.1. Création et entretien d'une colonie

Une importante colonie fondatrice d'au moins 100 larves devrait être recueillie, en veillant à échantillonner les insectes provenant d'un large éventail géographique représentatif du milieu cible du programme d'amélioration du maïs. Cela garantira la diversité génétique. Les insectes prélevés sur le terrain sont élevés dans l'isolement des autres insectes/pathogènes afin d'éviter toute contamination. Les insectes parasités, malades et déformés doivent être rejetés (Onyango et Ochieng'-Odero, 1994).

3.1.2. Installation et conditions d'élevage des insectes

Les stades de développement de la chenille légionnaire d'automne (œufs, larve, pupes et adulte ; voir Chapitre 1) diffèrent dans leurs exigences environnementales et dans leur gestion, et nécessitent par conséquent des chambres séparées, similaires aux installations d'élevage des insectes foreurs de tiges établies dans certains pays d'Afrique subsaharienne. (Avec des modifications appropriées, les mêmes installations peuvent être potentiellement utilisées pour l'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne, selon la capacité et les objectifs de l'insectarium). L'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne nécessite un espace approprié pour quatre chambres à savoir:

- a. Une chambre de préparation du support alimentaire et d'infestation.
- b. Une chambre de développement larvaire.
- c. Une chambre de récolte de la pupes.
- d. Une chambre d'émergence et d'oviposition de l'adulte.

Le laboratoire d'élevage est un nouvel habitat pour les insectes et devrait donc avoir des conditions environnementales propices à leur développement et à leur performance effective sur le terrain (température $25 \pm 1^\circ\text{C}$; photopériode de 12h d'éclaircissement ; et une humidité relative de $75 \pm 5\%$). Les chambres doivent être protégées des maladies, des parasites et des prédateurs. L'installation de l'équipement approprié dans chacune des quatre pièces permet de gagner en temps, d'accroître l'efficacité et d'améliorer la sécurité. De plus amples détails sur l'équipement requis pour l'élevage des chenilles légionnaires d'automne peuvent être obtenus auprès du CIMMYT (Anani Bruce ; a.bruce@cgiar.org).

3.1.3. Ingrédients et préparation du support alimentaire

L'élevage en masse de la chenille légionnaire d'automne peut se faire soit avec un régime naturel, soit avec un régime synthétique. Les protocoles pour les deux cas sont décrits ci-dessous:

3.1.3.1. Support alimentaire naturel

Le ricin (*Ricinus communis* L.) est une plante de la famille des Euphorbiacées. Il s'agit d'un arbuste/d'un petit arbre robuste à feuilles persistantes qui se multiplie par des graines. Certaines parties du ricin ont une activité insecticide et sont souvent utilisées comme biopesticides naturels, mais les feuilles peuvent aussi être utilisées pour soutenir l'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne (Cave 2000 ; Valicente *et al.* 2013 ; Martínez *et al.* 2015).

Préparer le support alimentaire comme suit:

- i. Prendre des feuilles fraîches de ricin, laver avec l'hypochlorite de sodium (5 ml/L) et rincer à l'eau pour éviter toute contamination.
- ii. Couper les feuilles en petits morceaux.
- iii. Placer 3 jeunes larves dans des boîtes plastiques de 30 ml contenant 4,3 g de morceaux de feuilles fraîches de ricin (Figure 1). Alternativement, au lieu de petites boîtes, jusqu'à 300 larves (du premier au troisième stade) peuvent être placées dans une boîte en plastique de 4L (Valicente *et al.* 2013).
- iv. Remplacer les feuilles tous les 2 à 3 jours, en fonction de leur fraîcheur.
- v. Puisque le cannibalisme est plus élevé chez les larves âgées (Chapman *et al.*, 1999), en particulier du 4^{ème} au 6^{ème} stade, placer les larves âgées dans des tubes à essai individuels de 30 ml.

Les larves de la chenille légionnaire d'automne sur régime naturel accomplissent généralement leur développement au bout de 15 à 20 jours, avec une nymphose qui dure approximativement 10 jours. On a constaté que le cannibalisme larvaire de la chenille légionnaire d'automne sur les feuilles de ricin était significativement réduit (presque de moitié) comparé à l'élevage sur le régime naturel à base de feuilles de maïs (Valicente *et al.* 2013).

3.1.3.2. Support alimentaire synthétique/artificiel

Le support alimentaire synthétique des insectes est un mélange de substances nutritives, notamment les glucides, les protéines, les lipides, les sels minéraux et les vitamines. Chacun remplit une fonction spécifique dans le développement de l'insecte et influence la durée de conservation du milieu / aliment artificiel ainsi constitué. En raison de la nature polyphage de la chenille légionnaire d'automne (capacité à se nourrir de plusieurs espèces végétales), elle peut être élevée avec succès sur de nombreux régimes qui ont été développés pour d'autres espèces d'insectes - par exemple, la chenille légionnaire d'automne peut être produite en masse avec succès sur l'aliment artificiel des foreurs de tige du maïs, tel que pratiqué par CIMMYT en Afrique.

Plusieurs supports alimentaires synthétiques ont été optimisés par diverses institutions, dont CIMMYT, l'IITA, le Centre International de Physiologie et d'Ecologie des Insectes (CIPE) et le Conseil pour la Recherche Agricole (*Agricultural Research Council - ARC*)-Afrique du Sud, en fonction de la disponibilité locale des ingrédients.

Les descriptions ci-dessous soulignent comment le support alimentaire synthétique d'élevage de masse de la chenille légionnaire d'automne est préparé actuellement par CIMMYT au Kenya (Figure 2), ARC en Afrique du Sud et CIPE au Kenya, sur la base de protocoles non publiés (résumés dans le Tableau 2). En outre, des «régimes à espèces multiples» commerciaux sont disponibles dans certains pays (*par ex.* <http://www.tecinfo.com/~southland/pricelist.html>). Certains laboratoires utilisent également le support alimentaire de la chenille du tabac (Produit#F9781B du Frontier Agricultural Sciences ; <http://www.insectrearing.com/products/indiets1.html>).

a) Le support alimentaire de CIMMYT³

Fraction A: Mélanger tous les ingrédients en poudre à l'exception du méthyle p-hydroxybenzoate de la Fraction A à l'aide d'une cuillère en plastique, dans un récipient propre et sous une hotte aspirante. Bouillir

³ Adapted from Onyango and Ochieng'-Odero (1994) and Songa *et al.* (2004).



Bac contenant l'élevage de la chenille légionnaire d'automne sur un régime naturel à base de feuilles de ricin



Larves de la chenille légionnaire d'automne se nourrissant de feuilles de ricin

Figure 1: Elevage de la chenille légionnaire d'automne sur feuilles de ricin.

l'eau distillée, la refroidir à 60°C, puis mélanger avec les ingrédients pré-mélangés à l'aide d'un mixeur pendant 1 minute. Ajouter le méthyle p-hydroxybenzoate (dissous dans 20 ml d'éthanol absolu) au mélange dans le mixeur, puis mélanger pendant 2 minutes supplémentaires.

Fraction B: Peser la poudre d'agar-agar (Figure 2) dans un récipient séparé, puis ajouter de l'eau distillée froide dans une casserole séparée. Bouillir en remuant périodiquement, puis refroidir à 60°C. Ajouter les ingrédients de la fraction B à la fraction A et mélanger pendant 3 minutes.

Fraction C: Enfin, ajouter 40% de formaldéhyde aux ingrédients de la Fraction A et B dans le mixeur puis mélanger pendant 3 minutes à température ambiante.

b) Le support alimentaire d'ICIPE

Préparer les Fractions A-C comme décrites pour le régime du CIMMYT, en utilisant les ingrédients et les quantités énumérées pour le régime d'ICIPE (Tableau 2).



Figure 2. Étapes de l'élevage de la chenille légionnaire d'automne sur un milieu artificiel.

c) Support alimentaire du ARC-RSA

Fraction A: Bien mélanger tous les ingrédients secs dans la fraction A avec 1500 ml d'eau distillée dans un récipient.

Fraction B: Faire bouillir 1 000 ml d'eau distillée, ajouter 7,5 g d'acide sorbique et remuer régulièrement jusqu'à dissolution de l'acide sorbique. Dans un récipient séparé, ajouter l'agar à 1000 ml d'eau et bien mélanger. Ajouter le mélange d'agar à l'acide sorbique. Faire bouillir pendant 10 minutes. Laisser la fraction B se refroidir à 70°C, puis l'ajouter à la Fraction A et bien mélanger avec un mixeur.

Fraction C: Ajouter du formaldéhyde (40%) au mélange de la fraction A et B. Dissoudre le Nipagen (3 g) dans 75 ml d'éther. L'ajouter au mélange de la fraction A et B.

Mettre une quantité appropriée du support alimentaire dans des plateaux en plastique, des boîtes ou des tubes à essai.

Tableau 2. Trois options possibles d'ingrédient pour le support alimentaire utilisées actuellement en Afrique pour l'élevage de la chenille légionnaire d'automne.

	Ingrédients	a) Support alimentaire de CIMMYT Quantité (g ou ml) pour 3L de support alimentaire	b) Support alimentaire de ICIPE Quantité (g ou ml) pour 3L de support alimentaire	c) Support alimentaire du ARC-RSA Quantité (g ou ml) pour 3L de support alimentaire
Fraction A				
1	Poudre de feuille de maïs	75,6g	75,0g	
2	Poudre d'haricot commun	265,2g	187,5g	
3	Pois chiche			250,0g
4	Germe de blé		150,0g	225,0g
5	Levure de bière	68,1g		45,0g
6	Levure de Torula		32,0g	
7	Lait en poudre		57,0g	45,0g
8	Acide ascorbique	7,5g	9,0g	15,0g
9	Acide sorbique	3,9g	4,5g	
10	Méthyle p- hydroxybenzoate de	6,0g	7,5g	
11	Capsules de vitamine E (200 iu)	6,3g		
12	Gouttes multivitamines		3,0ml	
13	Sucrose	105,9g		
14	Eau distillée	1,209,3ml	1,350,0ml	1,500,0ml
Fraction B				
15	Agar (Tech No.3)	37,8g	34,5g	50,0g
16	Eau distillée	1209,3ml	1200,0ml	1000,0ml
17	Acide sorbique			7,5g
Fraction C				
18	Formaldéhyde 40%	6,0ml	6,0ml	1,0ml
19	Suprapen p (Tétracycline)		7,5g	
20	Nipagen			3,0g
21	Éther			75,0ml

Sources: Support alimentaire de CIMMYT – une adaptation de Tefera *et al.* (2011) ; Support alimentaire de l'ICIPE – Sevgan Subramanian (ICIPE, Kenya), communication personnelle ; support alimentaire du CRA-RSA – Erasmus Annemie (CRA-Grain Crops, RSA), communication personnelle.

3.1.4. Infestation du support alimentaire

- i. Maintenir le support alimentaire sous la hotte aspirante pour qu'il se refroidisse et permettre à certains produits chimiques de s'évaporer.
- ii. Faire plusieurs trous à la surface du support alimentaire dans chaque boîte ou tube à essai en utilisant une tige plastique de laboratoire stérilisée ; cela facilitera la pénétration des larves.
- iii. Introduire des œufs surfaciquement désinfectés au stage tête noire ou des jeunes larves dans les trous percés dans le support alimentaire.
- iv. Plusieurs « néonates » de la chenille légionnaire d'automne peuvent être introduites dans le même récipient. Cependant, au troisième stade, les larves doivent être transférées dans des tubes à essai individuel pour cause du cannibalisme.
- v. Fermer les tubes à essai avec du coton bien ajusté.
- vi. Garder les boîtes/tubes à essai contenant les larves sur les étagères dans la salle d'élevage des larves dans des conditions ambiantes contrôlées (T: $27 \pm 1^\circ\text{C}$; RH: $65 \pm 5\%$; Photopériode 12: 12: luminosité: Obscurité).

3.1.5. Gestion des larves et des pupes

- i. Surveiller quotidiennement le développement des larves et des pupes pour identifier les problèmes tels que la contamination par des champignons ou des insectes, et se débarrasser immédiatement de tous les contenants avec des supports alimentaires contaminés. Commencer à suivre de près la collecte des pupes 14 à 20 jours après l'infestation sur le support alimentaire, et chaque jour par la suite pour éviter l'émergence des adultes dans les boîtes d'élevage.
- ii. Collecter les pupes une fois qu'au moins 50% des larves se sont nymphosées. Pour les recueillir, vider les supports alimentaires de chaque boîte dans un plateau propre, trier et transférer les pupes dans un récipient en plastique garni de papier torchon.
- iii. Conserver les larves qui ne sont pas encore nymphosées dans des boîtes en plastique stérilisées contenant des papiers torchons propres et humides jusqu'à ce que la nymphose ait lieu.
- iv. Nettoyer les pupes à l'aide d'une douce pulvérisation d'eau distillée, et les placer sur du papier torchon pour absorber l'excès d'humidité.
- v. Transférer les pupes dans des boîtes de Pétri propres (9 cm de diamètre) tapissées de papier torchon humide. Chaque boîte de Pétri peut contenir près de 100 pupes.
- vi. Placer les boîtes de Pétri dans une cage métallique d'émergence des adultes (cage de ponte, 45 x 60 x 45 cm), ventilée au sommet par une fine grille métallique.
- vii. Conserver les cages d'émergence à une température ambiante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$, une photopériode de 12: 12 luminosité: obscurité, et une humidité relative de $75 \pm 5\%$. L'humidité peut être maintenue en plaçant un gobelet en plastique contenant du coton imbibé d'eau dans la cage en tout temps.

3.1.6. Gestion des papillons

- i. Mettre une couche du papier de ponte dans la cage de ponte. Les papillons se nourrissent d'eau à partir du coton imbibé d'eau dans une boîte de Pétri placée dans chaque cage. Garder environ 100 papillons par cage de ponte.
- ii. Vérifiez quotidiennement chaque cage de ponte et:
 - a) Recueillir les œufs qui ont été pondus sur la couche du papier de ponte (voir 3.1.7).
 - b) Enlever les papillons morts de chaque cage.
 - c) Choisir et transférer les papillons vivants dans une cage fraîchement préparée contenant une couche du papier de ponte nouvelle et du coton fraîchement imbibé d'eau dans une boîte de Pétri.
 - d) Nettoyer et désinfecter la cage pour sa réutilisation.

3.1.7. Gestion des œufs

- i. Couper la couche du papier de ponte froissé avec des œufs déposés dessus en lots d'environ 50 œufs par lot, à l'aide de ciseaux.
- ii. Désinfecter en surface les œufs (sur la couche du papier de ponte) en les trempant dans du formaldéhyde 10% pendant 15 minutes, les rincer abondamment en utilisant de l'eau distillée, puis les sécher sur du papier filtre.

- iii. Transférer les lots d'œufs désinfectés en surface avec la couche du papier de ponte dans des récipients en plastique propres.
- iv. Garder les récipients en plastique dans la salle de ponte et laisser les œufs se développer pendant 4 à 6 jours.
- v. Maintenir une humidité relative de $75 \pm 5\%$ en plaçant au fond du récipient un large plat en plastique avec du coton imbibé d'eau.
- vi. Après environ 4 à 6 jours, les œufs se développent en stade tête noire qui éclosent ensuite en « néonates » après 1 à 2 jours. Les œufs du stade tête noire et les « néonates » peuvent être utilisés pour l'évaluation des génotypes de maïs.

3.1.8. Maintenir la qualité des insectes

L'objectif principal de l'élevage est d'obtenir des insectes de qualité acceptable. Un système de gestion de la qualité (SGQ) devrait donc être mis en œuvre si l'on envisage l'utilisation à long terme des insectes. Les paramètres utilisés dans la détermination de la qualité de la chenille légionnaire d'automne élevée en laboratoire comprennent le taux de survie, la période de développement (œuf à adulte), les malformations, la capacité reproductrice (nombre d'œufs pondus, la viabilité des œufs, le sex-ratio), l'indice de croissance (le ratio entre le pourcentage de nymphose et la période moyenne de développement larvaire) et l'adaptabilité en conditions de champs. La qualité des insectes élevés en laboratoire est régulièrement contrôlée par rapport aux paramètres de qualité susmentionnés (sans maladie, et avec une bonne capacité reproductrice). Si la qualité de la population d'insectes de laboratoire diminue en dessous d'un seuil d'au moins 300 œufs bien formés et exempts de maladies par femelle, jeter cette population, collecter une nouvelle colonie fondatrice d'insectes « sauvages » et reprendre l'établissement d'une nouvelle colonie (voir Section 3.1.1).

3.1.9. Gestion des maladies de l'insectarium

Les insectes sont des organismes biologiques vivants et sujets à des maladies lorsqu'ils sont élevés en masse au laboratoire (Polaszek 1998 ; Songa *et al.* 2004). Les milieux artificiels sont également propices à la croissance de certains micro-organismes dont plusieurs types auraient contaminé des insectariums - notamment les bactéries (*Streptococcus* spp., *Serratia* spp. et *Pseudomonas* spp.), les champignons (*Aspergillus* spp., *Rhizopus* spp., *Penicillium* spp.), les protozoaires (*Nosema* spp.) et les virus. La plupart de ces micro-organismes ne sont pas directement nocifs pour la chenille légionnaire d'automne ; toutefois, *Serratia marcescens*, *Nosema* spp. et les *baculovirus* sont pathogènes pour les insectes et peuvent provoquer une épidémie dans un insectarium, tandis que les autres organismes contaminants peuvent néanmoins causer la détérioration du milieu artificiel ou altérer le rendement biologique des insectes. Les sources de contamination microbienne dans un insectarium peuvent comprendre les insectes collectés sur le terrain, une mauvaise manipulation des insectes, un environnement malpropre au sein de l'insectarium ; ou une stérilisation inadéquate des récipients et des supports alimentaires pendant la préparation, le stockage et l'utilisation. L'enlèvement et l'élimination immédiats des supports alimentaires contaminés et des insectes infectés, la stérilisation adéquate des supports alimentaires, des zones de travail et les équipements collectifs, la bonne hygiène du personnel, et le suivi des recommandations en matière de sécurité au travail (voir la Section 3.1.10) minimiseront la contamination microbienne d'un insectarium. De plus, l'examen pathologique régulier des cadavres des larves, des pupes et des adultes peut également aider à la détection précoce et à l'élimination des insectes malades.

3.1.10. Sécurité au travail

En plus d'observer toutes les pratiques standards en matière de sécurité des laboratoires et les politiques institutionnelles en matière de santé et de sécurité, il convient de veiller particulièrement aux écailles des papillons et aux vapeurs toxiques lors de l'application de ces protocoles, car ce sont là les principaux problèmes de santé associés à l'élevage et à l'entretien des populations artificielles de la chenille légionnaire d'automne. Les écailles de papillon et les vapeurs toxiques pendant la stérilisation peuvent causer des problèmes respiratoires et des allergies, alors que les émanations toxiques du formaldéhyde utilisées dans la préparation du support alimentaire peuvent nuire à la santé humaine.

Afin de maintenir la qualité des insectes élevés en laboratoire, éviter les contaminants microbiens et minimiser les risques potentiels pour la santé des travailleurs de l'insectarium, les pratiques suivantes doivent être suivies rigoureusement dans l'insectarium:

- a. Restreindre l'accès à l'insectarium uniquement qu'aux travailleurs de l'insectarium.
- b. Utilisez une hotte aspirante bien ventilée pour préparer le support alimentaire afin de prévenir l'exposition aux vapeurs toxiques.
- c. Tout le personnel de l'insectarium doit maintenir une hygiène personnelle élevée.

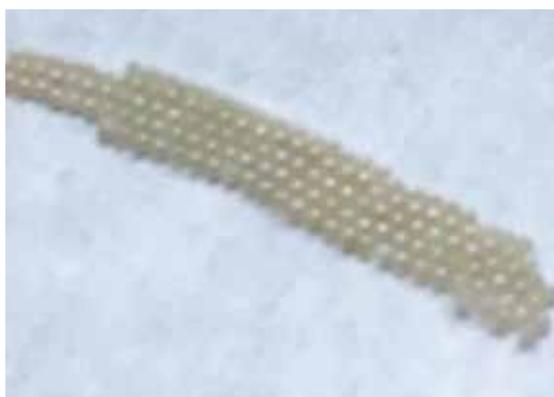
dans des parcelles plus grandes, de préférence sous inoculation artificielle, pour confirmer que la sélection n'a pas été influencée par les préférences alimentaires des insectes lorsque plusieurs matériaux de germoplasme sont présents dans de petites parcelles.

3.2.2. Infestation artificielle

L'infestation artificielle est la méthode la plus fiable de criblage des génotypes du maïs contre la chenille légionnaire d'automne. Pour la préparation, les larves de premier stade de la chenille légionnaire d'automne (néonates) peuvent être élevées dans un laboratoire d'élevage d'insectes (voir Section 3.1). Les matériaux du germoplasme du maïs pour la sélection devraient être évalués sous serre.

Deux semaines après l'émergence des semis (au stade « V5 » du maïs), infester chacune des plantes d'une rangée avec au moins 20 œufs de la chenille légionnaire d'automne au stade de tête noire ou 10 néonates (premier stade larvaire de la chenille légionnaire d'automne). Dans le cas des larves de la chenille légionnaire d'automne, compte tenu de leur nature cannibalistique, les larves devraient être espacées dans différents nœuds de la plante pendant l'infestation. L'infestation peut être effectuée manuellement avec un pinceau (Figure 4) ou un applicateur d'insectes Bazooka (Tefera *et al.* 2011). Il est conseillé d'infester les plantes avec les insectes tôt le matin (entre 7 et 9 h) ou tard dans l'après-midi (après 16 h), afin d'éviter d'exposer les jeunes larves à des conditions rigoureuses et ensoleillées qui pourraient dessécher les larves avant qu'elles ne soient adaptées au climat et à l'hôte. L'application d'un niveau uniforme et suffisant de pression d'insectes à chaque plante de l'essai est essentielle. Le niveau de pression des insectes est jugé approprié lorsque le témoin susceptible est fortement affecté systématiquement à travers toutes les répétitions, et au moins trois quarts des plantes d'un groupe de traitement sont infestées ou présentent des dégâts constants dus aux insectes (à travers les répétitions).

Note: Différents protocoles peuvent être adaptés par différentes institutions en ce qui concerne l'infestation artificielle à l'aide de néonates de la chenille légionnaire d'automne sur le terrain pour déterminer les réponses du germoplasme. Cette description met en évidence le protocole suivi par CIMMYT.



Masse d'œufs de la chenille légionnaire d'automne recueillis sur un papier de ponte provenant de la cage d'oviposition



Les larves néonates de la chenille légionnaire d'automne émergeant de la masse d'œufs noirs (3 à 6 jours après le stade de masse d'œufs blancs)



Larves néonates nouvellement écloses recueillies à partir de la masse d'œufs noirs



Infestation artificielle d'une plante de maïs dans un champ par les néonates de la chenille légionnaire d'automne à l'aide d'un pinceau

Figure 4. Infestation artificielle de plants de maïs avec la chenille légionnaire d'automne après l'élevage en masse.

3.2.3. Collecte de données: classement des réponses du germoplasme du maïs

La classification utilisée dans le criblage du maïs avec la chenille légionnaire d'automne est principalement basée sur le niveau des dégâts des plantes. Les données sur les dommages foliaires dus à l'infestation par la chenille légionnaire d'automne devraient être recueillies au moins deux ou trois fois pendant la croissance des cultures commençant 7 à 10 jours après l'infestation artificielle et répétée après un intervalle de 10 jours. Les dommages sur épi et, finalement, les données sur le rendement en grains sont enregistrés au moment de la récolte.

3.2.3.1. Classement de germoplasme basé sur les dégâts foliaires causés par la chenille légionnaire d'automne

Les dégâts foliaires dus à l'infestation par la chenille légionnaire d'automne devraient être évalués en enregistrant chaque plant infesté dans une population de germoplasmes sur une échelle de 1 à 9 (Davis & Williams 1992), où les plants très résistants sont notés 1 (aucun dommage visible) et des plants très sensibles 9 (complètement endommagé) (Tableau 3 ; Figure 5).

Tableau 3. Échelle d'évaluation des dégâts foliaires dus à la chenille légionnaire d'automne dans les populations de germoplasmes du maïs.

Score	Dommages symptômes/description	Réponse
1	Aucune feuille dévorée visible	Très résistant
2	Peu de petits trous sur 1 à 2 feuilles plus anciennes	Résistant
3	Plusieurs lésions de perforation sur quelques feuilles (<5 feuilles) et un petit trou circulaire endommageant les feuilles	Résistant
4	Plusieurs lésions de perforation sur plusieurs feuilles (6 à 8 feuilles) ou de petites lésions/trous d'épingle, petites lésions circulaires, et quelques petites lésions allongées (en forme rectangulaire) d'une longueur allant jusqu'à 1,3 cm présentes sur les feuilles verticillées et roulées	Partiellement résistant
5	Les lésions allongées (> 2,5 cm de long) sur 8 à 10 feuilles, plus quelques petits et moyens trous de forme uniforme à irrégulière (membranes basale consommées) faits sur les feuilles verticillées et/ou roulées	Partiellement résistant
6	Plusieurs grosses lésions allongées présentes sur plusieurs feuilles verticillées et/ou plusieurs gros trous uniformes à des trous en forme irrégulière faits sur les feuilles roulées et verticillées	Susceptible
7	De nombreuses lésions allongées de toutes tailles présentes sur plusieurs feuilles verticillées et roulées ainsi que plusieurs gros trous uniformes à irréguliers faits sur les feuilles verticillées et roulées	Susceptible
8	De nombreuses lésions allongées de toutes tailles présentes sur la plupart des feuilles verticillées et roulées ainsi que de nombreux trous moyens à gros, uniformes à irréguliers faits sur les feuilles verticillées et roulées	Très susceptible
9	Les feuilles verticillées et roulées sont presque totalement détruites et la plante meurt à cause de dégâts foliaires considérables	Très susceptible

Source: Modifié de Davis and Williams (1992).

La méthode d'évaluation devrait donner des réponses distinctes entre les matériaux résistants et susceptibles. Lorsque de telles réactions sont distinctes, une résistance modérée dans les populations testées peut également être détectée. La réaction des plantes et le classement subséquent des dommages dépendent du nombre d'insectes par plante, de la vigueur de la plante, de l'âge de la plante et des facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité. La pression de la population d'insectes appliquée devrait être optimale (habituellement 20 jeunes larves par plant), de manière à démêler la variabilité génétique des populations de germoplasmes testées. Lorsque la population d'insectes est trop élevée, tous les matériaux peuvent paraître sensibles. Par contre, quand elle est trop basse, tous les matériaux peuvent sembler résistants. Les plants qui manquent de vigueur en raison des carences nutritives ou d'autres facteurs, et les plants extrêmement jeunes, peuvent également être considérés à tort comme étant sensibles, bien que dans des conditions optimales, elles puissent être résistantes ou partiellement résistantes.

À la maturité physiologique, récolter tous les plants, à l'exception des plants des deux lignes de bordure. Egrenier les épis de chaque parcelle séparément, et prendre le poids en grain avec une teneur en eau de 12 à 13%.

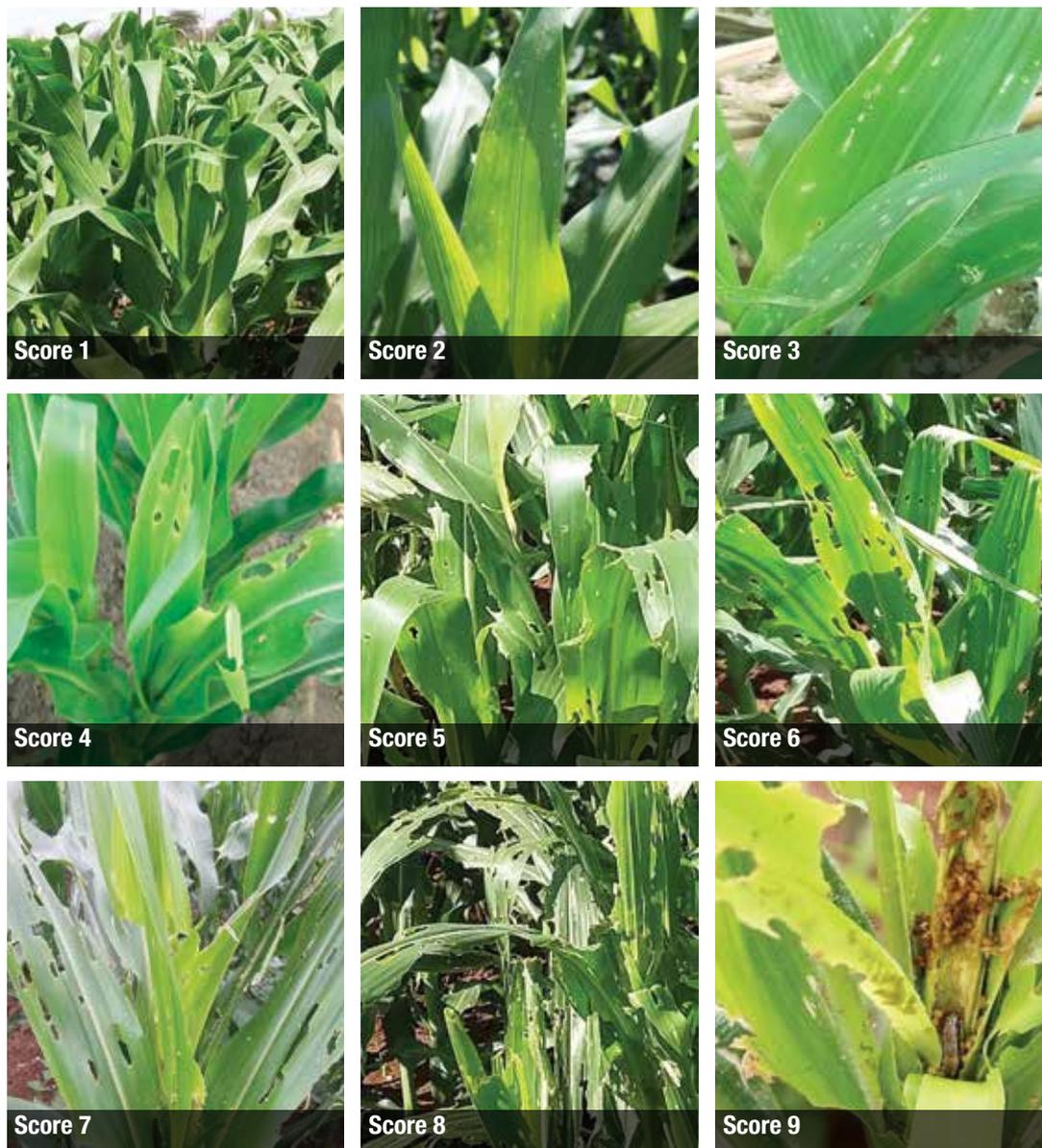


Figure 5. Classement des plants de maïs en fonction des dommages foliaires causés par la chenille légionnaire d'automne.

3.2.3.2. Classement du germoplasme sur la base des dégâts causés à l'épi et au grain par la chenille légionnaire d'automne

La chenille légionnaire d'automne est non seulement capable de causer des dommages foliaires importants sur le germoplasme sensible, mais est également capable d'endommager l'épi ou le grain lorsque les larves entrent dans les épis en développement. Par conséquent, l'évaluation du germoplasme sous l'infestation naturelle/artificielle doit également tenir compte des dommages potentiels causés par l'insecte sur les épis et les grains (Figure 6 ; Tableau 4).

Les épis individuels pour chacune des matériaux de germoplasme sont notés au moment de la récolte, et le score moyen des dommages causés par épi pour un matériel du germoplasme est alors calculé.

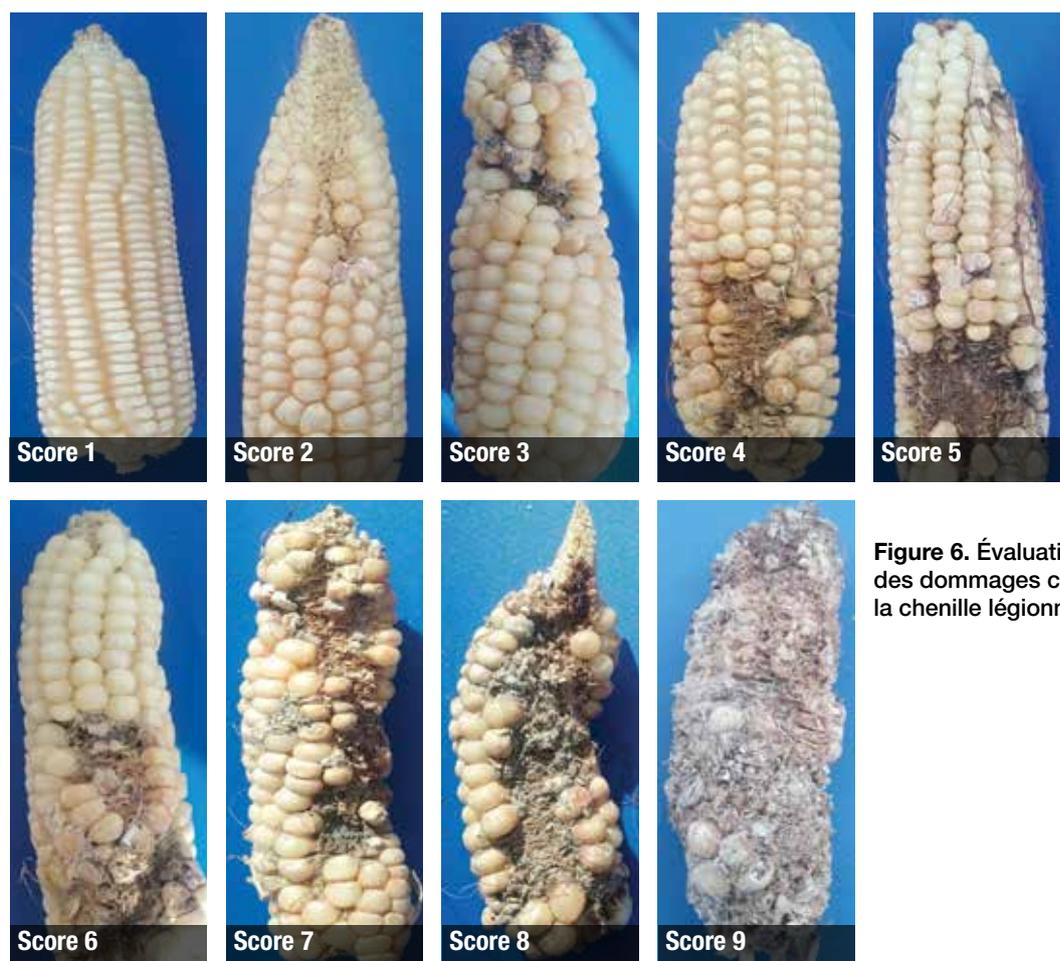


Figure 6. Évaluation sur la base des dommages causés à l'épi par la chenille légionnaire d'automne.

Tableau 4. Classification du germoplasme sur la base des dommages causés sur épi et au grain par la chenille légionnaire d'automne.

Score	Domage symptômes/description	Réponse
1	Aucun dommage causé sur l'épi	Très résistant
2	Dommages sur quelques grains (<5) ou moins de 5 % de dommages sur un épi	Résistant
3	Dommages sur quelques grains (6 à 15) ou moins de 10 % de dommages sur un épi	Résistant
4	Dommages sur 16 à 30 grains ou moins de 15 % de dommages sur un épi	Partiellement résistant
5	Dommages sur 31 à 50 grains ou moins de 25 % de dommages sur un épi	Partiellement résistant
6	Dommages sur 51 à 75 grains ou plus de 35 % mais moins de 50 % de dommages sur un épi	Susceptible
7	Dommages sur 76 à 100 grains ou plus de 50 % mais moins de 60 % de dommages sur un épi	Susceptible
8	Dommages sur >100 grains ou plus de 60% mais moins de 100 % de dommages sur un épi	Très susceptible
9	Presque 100% de dommages sur un épi	Très susceptible

Source: CYMMIT, protocole non publié.

Note: Les programmes de sélection pour la résistance à la chenille légionnaire d'automne ont été largement basés sur les dégâts occasionnés sur feuilles plutôt que sur épi. Bien qu'il soit utile de classer les dégâts sur épi pour prendre des décisions sur les travaux de sélection, les programmes de sélection devraient déterminer de façon empirique quelle importance relative devrait être accordée au classement basé sur les dégâts foliaires par rapport aux dégâts sur épi.

Limitations/domaines de recherche

Résistance naturelle ou d'origine

1. Existe-t-il déjà des cultivars africains de maïs et d'autres cultures résistant à la chenille légionnaire d'automne qui ont déjà été mis en circulation?
2. Est-ce que le germoplasme du maïs résistant à la chenille légionnaire d'automne, obtenu de manière conventionnelle, offre une résistance à la fois aux souches de «riz» et de «maïs» de la chenille légionnaire d'automne en Afrique (voir Chapitre 1, Section 2.6)?
3. Comment peut-on améliorer l'accès et l'utilisation de plusieurs sources de résistance naturelle, basée sur des caractères spécifiques par les sélectionneurs afin de développer une résistance généralisée aux populations de chenille légionnaire d'automne en Afrique?
4. Y a-t-il une corrélation entre les dommages foliaires et les dommages sur les épis ou les dommages foliaires et le rendement en grains?
5. Existe-t-il des différences significatives dans le germoplasme du maïs en ce qui concerne la préférence de l'adulte de la chenille légionnaire d'automne pour l'oviposition/la ponte sur une ligne donnée?
6. Comment peut-on améliorer au mieux le système de classification de résistance à l'aide d'outils de détection proximale et à distance?
7. Quelles sont les possibilités ou les technologies existantes pour accélérer le développement et le déploiement de variétés de maïs adaptées à l'Afrique (*par ex.*, l'utilisation de marqueurs moléculaires, technologie haploïde doublée)?
8. Quel poids relatif devrait-on accorder à l'évaluation des dommages liés à la consommation des feuilles par les ravageurs par rapport à l'évaluation des dommages sur l'épi afin d'optimiser l'amélioration de la résistance à la chenille légionnaire d'automne pour les agriculteurs africains?

Résistance transgénique

9. Les populations de chenille légionnaire d'automne en Afrique sont-elles résistantes à l'un des transgènes connus envisagés pour le déploiement?
10. Élaborer une stratégie de gestion de la résistance aux insectes adaptée aux systèmes culturels et aux agro-écologies en Afrique.

Messages clés aux décideurs

Résistance naturelle

1. Un criblage approfondi du germoplasme des cultures vulnérables à la chenille légionnaire d'automne en Afrique doit être entrepris.
2. Il faut des efforts d'amélioration accélérée pour transférer la résistance naturelle issue des sources validées vers divers matériaux élite de maïs adaptés à l'Afrique (VPL/hybrides/lignées) pour être déployés dans les communautés agricoles. Des efforts similaires sont nécessaires au niveau d'autres grandes cultures affectées par la chenille légionnaire d'automne en Afrique.
3. Accélérer la publication et l'enregistrement des VPL (Variétés à pollinisation libre) /hybrides conventionnels ou pures de maïs d'élite adaptés à l'Afrique, résistantes à la chenille légionnaire d'automne et préférées par les producteurs (avec des caractères adaptatifs pertinents) sur la base d'une année de Tests Nationaux de Performance (au lieu de 2 ans).
4. Nécessité d'une adoption urgente des politiques visant à harmoniser la mise en circulation des variétés entre les pays/régions, et à remplacer les variétés très susceptibles par des variétés résistantes identifiées.

Résistance transgénique

5. Le maïs *Bt* est un outil important dans la boîte à outils pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne.
6. La technologie a fait ses preuves dans les Amériques, avec 20 ans d'expérience et de succès sur le terrain. La technologie du maïs *Bt* a été l'un des outils les plus efficaces pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne aux États-Unis et au Brésil.
7. Le projet WEMA a testé de façon approfondie le maïs *Bt* dans le cadre des tests en champ confinés dans cinq pays africains (bientôt six) afin de démontrer l'innocuité, l'efficacité et le rendement dans les conditions africaines.
8. Certaines instances de régulation africaines ont renforcé leurs capacités de prise de décisions scientifiques pour répondre aux questions et aux préoccupations de la société concernant la sécurité, l'efficacité et le rendement de la technologie *Bt*.
9. Les transgènes pyramidaux avec différents modes d'action (p. ex. *Cry + Vip3A*) sont plus efficaces par rapport au déploiement monogénique, surtout en termes de durabilité de la résistance.
10. Une bonne intendance est importante pour assurer la durabilité de la technologie et pour s'attaquer au développement de la résistance des insectes.



CHAPITRE 05

Lutte biologique et pesticides bio-rationnels pour la gestion de la chenille légionnaire d'automne

Auteurs: Ivan Cruz, Embrapa, Brésil ; Anani Bruce, CIMMYT-Kenya ; Subramanian Sevgan, Komivi Senyo Akutse, Faris Samira Mohamed, Saliou Niassy, ICIPE, Kenya ; Muniappan Rangaswamy, Jaspreet Sidhu, Virginia Tech, États-Unis ; Georg Goergen, IITA, Bénin ; Ivan Rwomushana, CABI, Kenya ; Muo Kasina, KALRO, Kenya ; Malick Ba, ICRISAT, Niger ; Ebenezer Aboagye, NPPO, Ghana ; Dietrich Stephan, Joerg Wennmann, Institut Julius-Kühn, Allemagne ; Ernst Neering, NPPO, Pays-Bas ; et Wilfred Mushobazi, Crop Bioscience Ltd., Tanzanie.

1. Introduction

1.1. Quelles sont les options biologiques et bio-rationnelles de lutte contre le ravageur?

Dans la nature, la population de chaque organisme est réglementée. Elle est maintenue en fluctuation entre le plus élevé et le plus faible seuil, souvent en deçà des seuils de dégâts économiques, due à des actions de régulation biotique (disponibilité des aliments, parasites, prédateurs, et/ou des agents pathogènes) et/ou des facteurs abiotiques (facteurs climatiques et telluriques). Une telle régulation de la population s'appelle une lutte naturelle. Cependant, lorsque cette régulation naturelle est perturbée par des facteurs biologiques, anthropiques ou climatiques, cela provoque une irruption d'organismes conduisant à des dégâts économiques. L'invasion d'un ravageur dans de nouvelles zones géographiques en l'absence de facteurs biotiques réglementaires se traduit souvent par la perturbation de la lutte naturelle, conduisant à des épidémies dévastatrices (par exemple, la chenille légionnaire d'automne, *Spodoptera frugiperda* [J.E. Smith], la mineuse des feuilles de tomate, *Tuta absoluta* [Meyrick]). Les changements anthropogéniques dans les pratiques de gestion des cultures et des ravageurs tels que l'introduction d'une culture sensible / cultivar, les monocultures, et l'utilisation irrationnelle des pesticides à large spectre, etc., ont souvent pour résultat la perturbation de la régulation naturelle, conduisant à des épidémies de ravageurs et de maladies. L'asynchronisme dans la gamme d'expansion des ravageurs et leurs ennemis naturels suite au changement climatique pourrait aussi être de nature à perturber la régulation naturelle.

La meilleure approche pour gérer ces épidémies est de renforcer ou d'établir autant que possible la régulation naturelle. La lutte biologique se focalise principalement sur la restauration de la régulation naturelle. La lutte biologique, telle que définie par Paul DeBach (1964), est l'action des organismes vivants (parasites, prédateurs, ou des agents pathogènes) introduits par l'homme pour réguler la population d'un autre organisme à des densités inférieures à celles qui se produiraient en leur absence. Les parasitoïdes sont des agents biologiques dont au moins l'une des étapes de vie est intimement associée à des stades de vie du ravageur et des niveaux plus élevés de spécificité (par exemple, les espèces parasitoïdes appartenant aux trichogrammes et au *Telenomus* qui parasitent les œufs d'insectes, y compris la chenille légionnaire d'automne). Les larves de parasitoïdes tuent toujours leur hôte comme résultat de leur développement. Les prédateurs, par contre, ne sont jamais intimement associés aux ravageurs, et ces derniers leur servent de proie souvent avec moins de spécificité (par exemple, des insectes tels que les coccinelles, les perce-oreilles et les insectes suceurs de sève tels que *Orius* et *Podisus* font des divers stades de vie de la chenille légionnaire d'automne leurs proies). Les entomopathogènes comprennent des bactéries, des champignons, des protozoaires, des nématodes, ou des virus qui infectent et provoquent des maladies chez les insectes (par exemple, des champignons tels que le *Metarhizium anisopliae* et le *Beauveria bassiana*, des virus tels que le *Spodoptera frugiperda*, les multi- nucléopolyédrovirus (SfMNPV), et des bactéries telles que *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), et d'autres qui sont connus pour infecter la chenille légionnaire d'automne).

Selon la façon dont la lutte biologique est entreprise, elle peut être largement classée comme une lutte biologique classique (inoculative), une lutte biologique par augmentation (inondative) ou une lutte biologique de conservation. La lutte biologique classique (inoculative) est souvent entreprise pour lutter contre les ravageurs envahissants ; dans cette méthode, une espèce exotique d'ennemis naturels de la région où l'insecte ravageur est originaire et avec un haut niveau de spécificité d'hôtes est importée et lâchée dans les régions envahies. La réussite d'une lutte biologique classique résulte d'un contrôle étendu, continu et à grande échelle de l'espèce invasive (par exemple le lâcher du *Cotesia flavipes* pour le contrôle du foreur asiatique *Chilo partellus* en Afrique). Avant l'invasion en Afrique, la chenille légionnaire d'automne a été répandue dans les régions néarctique et néotropicale d'Amérique depuis plusieurs siècles et associée à plusieurs ennemis naturels. Certains d'entre eux pourraient être des candidats potentiels aux initiatives de lutte biologique classique en Afrique.

Une approche de la lutte biologique par augmentation (inondative) implique des lâchers périodiques des ennemis naturels ou des agents pathogènes, qui sont introduits ou endémiques, pour favoriser la lutte biologique ou provoquer des épizooties d'agents pathogènes contre des ravageurs envahissants ou endémiques. Contrairement aux deux premières formes, la lutte biologique de conservation implique la manipulation de l'environnement, des systèmes culturels, et des pratiques de manière à favoriser les ennemis naturels au détriment du ravageur. Au cours du processus d'invasion, les espèces envahissantes sont susceptibles de rencontrer des ennemis naturels d'autres espèces étroitement liées. Certains de ces ennemis naturels pourraient s'adapter au ravageur envahissant, souvent appelé « nouvelles associations ». Il est important de comprendre que, avant l'invasion de la chenille légionnaire d'automne, l'Afrique abrite plusieurs espèces de lépidoptères appartenant au genre *Spodoptera*. La chenille légionnaire d'Afrique (*Spodoptera exempta* [Walker]), la chenille légionnaire de la betterave (*Spodoptera exigua* [Hübner]), et la chenille du coton d'Afrique (*Spodoptera littoralis* Boisduval) sont parmi les espèces les plus largement répandues avec des ennemis naturels et des entomopathogènes efficaces, ce qui renforce la probabilité de la mise sur pied de nouvelles associations pour contrer la chenille légionnaire d'automne. L'utilisation d'un procédé de lutte biologique pour contrôler une espèce de ravageur n'a normalement pas d'incidence sur les performances d'autres agents biologiques importants dans la régulation des populations de ravageurs, bien que dans certains cas il existe une prédation intraguilde.

Le concept de pesticides bio-rationnels englobe les produits de lutte contre le ravageur qui sont efficaces contre les ravageurs cibles, mais sont sans danger pour les ennemis naturels et, en général, pour l'environnement. Les pesticides bio-rationnels souvent se réfèrent à des produits dérivés de sources naturelles telles que les plantes, les bio-pesticides et autres. Pour ce chapitre, nous restreindrons nos informations sur les pesticides bio-rationnels aux pesticides botaniques et aux bio-pesticides. L'utilisation intégrée des options de lutte notamment la lutte biologique et les pesticides bio-rationnels ainsi que d'autres telles que les méthodes culturales et la résistance variétale, doit réduire considérablement la dépendance aux pesticides pour la lutte contre les ravageurs. À cet effet, l'objet de ce chapitre sera de faire le point sur la diversité des options biologiques et bio-rationnelles de lutte contre le ravageur qui sont disponibles dans la région d'origine de la chenille légionnaire d'automne et montrent le potentiel pour sa lutte en Afrique.

2. La lutte biologique basée sur les stratégies de la lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne

La chenille légionnaire d'automne est originaire des Amériques et est une espèce de ravageur nouvellement introduite en Afrique. Comme c'est le cas avec les espèces invasives, la plupart des agents biologiques naturels de ce ravageur ne sont pas présents ou les espèces indigènes ne sont pas encore adaptées à ce nouvel hôte ou à cette nouvelle proie. La mise en œuvre de toute stratégie de lutte intégrée en Afrique pour le contrôle de la chenille légionnaire d'automne devrait chercher à éviter de perturber les processus de contrôle biologique qui sont opérationnels pour d'autres ravageurs et ceux qui s'adaptent à la chenille légionnaire d'automne.

La conservation de la diversité et de la densité des ennemis naturels devrait être une priorité de cette stratégie. Un moyen simple d'y parvenir est de fournir, près des zones de production de maïs, des conditions propices à la survie des agents de lutte naturelle. La plantation de cultures qui fournissent un abri, des sources alimentaires alternatives et des conditions de multiplication d'espèces bénéfiques peuvent être nécessaires pour réglementer la population de la chenille légionnaire d'automne. Aux bordures des zones de culture du maïs, des rangées de cultures telles que le tournesol mexicain ou *Crotalaria* pourraient être des éléments appropriés de la gestion du paysage dans le but d'accroître la biodiversité des insectes bénéfiques, même ceux qui ne sont pas encore associés à la chenille légionnaire d'automne. La stratégie « Repousser-Attirer » (Push-Pull) peut également être utilisée ; Grâce à cette dernière, les plantes répulsives aux ravageurs sont associées avec la culture principale pour repousser «push» les ravageurs hors du champ, qui est également entourée de plantes attractives aux ravageurs comme bordure pour attirer «pull» à la fois les insectes nuisibles et les insectes bénéfiques (<http://www.push-pull.net/> ; voir également Chapitre 6).

La deuxième étape dans la mise en œuvre d'une lutte biologique basée sur la stratégie de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne consiste à évaluer les niveaux de préjudices économiques (NPE) ; à renforcer les efforts de suivi, de détection et de surveillance (voir Chapitre 2) ; et entreprendre des efforts de lutte contre le ravageur à travers le lâcher inondatif d'ennemis naturels ou à travers l'utilisation de pesticides bio-rationnels, tels que les extraits botaniques ou les biopesticides, en particulier lorsque la densité du ravageur dépasse le NPE.

2.1. Avantages de l'utilisation de la lutte biologique contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique

Les systèmes de production de maïs à petite échelle en Afrique sont diversifiés, notamment en termes de taille, de culture mixte, de saisonnalité et d'autres caractéristiques, contrairement aux systèmes de monoculture commerciale de grande envergure des Amériques. En outre, les niveaux d'utilisation des pesticides sur le maïs sont actuellement beaucoup plus faibles en Afrique que dans les autres régions du monde. Ce sont des conditions idéales pour une préservation efficace des ennemis naturels et pour atteindre pleinement les bienfaits de la lutte biologique (Herren et Neuenschwander, 1991 ; Macharia *et al.* 2005 ; Soul-kifouly *et al.* 2016). La lutte biologique, en particulier la lutte biologique classique et de conservation, est beaucoup moins coûteuse et profite aux systèmes de production à petite échelle en Afrique. De plus, il n'existe aucun cas de développement de résistance chez la chenille légionnaire d'automne aux agents de lutte biologique. Grâce à des initiatives efficaces de renforcement des capacités, l'Afrique peut tirer parti de la main d'œuvre disponible, tels que les associations d'agriculteurs, pour produire en masse et distribuer des agents de lutte biologique contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique, comme pour la lutte biologique de mineurs de petit mil au Niger et au Sénégal.

Par conséquent, sur la base de l'expérience globale de la lutte contre les ravageurs du maïs, la lutte biologique constituera un pilier nécessaire de la stratégie d'une lutte intégrée pour le contrôle de la chenille légionnaire d'automne en Afrique. Toutefois, pour exploiter ce potentiel, il est important d'évaluer la diversité et l'efficacité des espèces de lutte biologique sur le continent afin d'identifier de nouvelles associations. De plus, en faisant le point sur la diversité

des agents de lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne aux États-Unis, il faut entreprendre la sélection de potentiels agents appropriés pour la lutte biologique classique de la chenille légionnaire d'automne en Afrique sur la base des évaluations d'adéquation écologique. Il faut identifier et promouvoir les pesticides bio-rationnels efficaces susceptibles de contribuer à la lutte contre la chenille légionnaire d'automne et à la conservation des ennemis naturels. Les évaluations préliminaires des espèces de lutte biologique sur le continent suggèrent que nous devrions optimiser le rôle du contrôle biologique dans la lutte contre la chenille légionnaire d'automne. (IPM Innovation Lab 2017 ; <https://ipmil.oiored.vt.edu/wp-content/uploads/2017/07/Muni-FAW-PPT-1.pdf>).

2.2. Lâcher inondatif d'un agent de contrôle biologique contre la chenille légionnaire d'automne

Comme mentionné ci-dessus, les guêpes *Trichogramma* ou *Telenomus* sont les meilleurs exemples d'espèces utilisées dans le lâcher inondatif pour lutter contre les œufs de la chenille légionnaire d'automne. Contrairement aux traitements pesticides, qui doivent couvrir l'ensemble de la plante (le verticille ou l'épi du maïs) pour atteindre le ravageur cible, les parasitoïdes des œufs peuvent être lâchés à un moment donné dans la zone cible. Une fois lâchées, les guêpes, avec une capacité de recherche extrême, volent vers les plantes à la recherche des œufs de ravageurs. Ainsi, les lâchers sont effectués à des points stratégiques allant de 20 à 40 par hectare (Cruz *et al.* 2016).

Compte tenu de la longévité très courte (moins de 3 jours) de la femelle lâchée et du fait qu'une nouvelle génération de parasitoïdes survient 10 jours après le lâcher, il est nécessaire de faire trois lâchers espacés à intervalles de 3 jours pour assurer une présence continue d'adultes dans la zone. De nouveaux lâchers peuvent être nécessaires s'il y a une augmentation significative du déplacement des papillons dans la zone de production, comme l'indique des pièges de suivi. Le lâcher inondatif des guêpes *Trichogramma/Telenomus* dans les champs de maïs ne réduit pas les populations d'autres espèces bénéfiques. Des études de compétitions interspécifiques devraient être réalisées avant l'introduction de nouveaux ennemis naturels. La chenille légionnaire d'automne consomme principalement des feuilles mais peuvent aussi utiliser les graines comme source de nourriture. À l'intérieur du verticille, les larves sont protégées, ce qui rend difficile l'utilisation de mesures de contrôle conventionnelles comme l'utilisation de pesticides. La présence de la chenille légionnaire d'automne dans l'épi du maïs résulte de la migration des larves pendant la floraison mâle, car elles sont poussées hors du verticille, à l'intérieur et sur les épis. Le lâcher de *Trichogramma/Telenomus* au début de la saison aide à supprimer la migration des larves de la chenille légionnaire d'automne dans les épis.

La synchronisation entre la présence de masses d'œufs de chenille légionnaire d'automne et le lâcher de parasitoïdes dans la culture du maïs est nécessaire au succès de la lutte biologique utilisée. Le suivi de l'arrivée des papillons dans la zone cible en utilisant des pièges à phéromones (voir Chapitre 2) est plus efficace que la recherche manuelle de masses d'œufs. Les premières captures de papillons signalent l'arrivée du ravageur dans la région et indiquent que l'oviposition ou la ponte est proche.

2.3. Importance d'autres insectes bénéfiques dans la lutte naturelle de la chenille légionnaire d'automne

Il existe une diversité biologique considérable d'insectes bénéfiques dans les champs de maïs des Amériques et des Caraïbes (Molina-Ochoa *et al.* 2003 ; Cruz *et al.* 2009). La guêpe braconide, *Chelonus insularis* Cresson, est l'un des principaux agents de lutte biologique naturel (Meagher *et al.* 2016). Tout comme les parasitoïdes des œufs, *Chelonus* parasite l'œuf de la chenille légionnaire d'automne ; cependant, les œufs de la chenille légionnaire d'automne éclosent en larves et le parasitoïde adulte émerge de la larve. Parce que *Chelonus* est un insecte beaucoup plus grand que les guêpes *Trichogramma/Telenomus*, *Chelonus* est plus compétitif. Les larves parasitées réduisent graduellement leur consommation alimentaire, consommant moins de 10 % de la biomasse consommée par une larve non parasitée (Rezende *et al.* 1994). Par conséquent, la présence de petites larves dans la zone du lâcher de *Trichogramma* ne signifie pas nécessairement un échec dans la lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne. Rezende *et al.* (1995 a,b) fournissent de plus amples informations sur le rôle du *Chelonus* dans la lutte intégrée contre le ravageur.

En plus de *C. insularis*, plusieurs autres espèces de parasitoïdes sont également considérées comme importantes dans la suppression des populations de larves de chenille légionnaire d'automne (Figueiredo *et al.* 2009). Par exemple, le *Campoplex flavicincta* a été largement utilisé (Matrangolo *et al.* 2007 ; Matos Neto *et al.* 2004). Jusqu'à présent en Afrique, le *Charops ater* Szépligeti (Ichneumonidae), *Chelonus curvimaculatus* Cameron, *C. madae* Huddleston, *Coccylidium luteum* (Brullé) (Braconidae) et *Telenomus* spp. (Platygastridae) sont des parasitoïdes d'œufs et des larves qui sont associés à *S. frugiperda* en Afrique de l'Est et de l'Ouest (Mohamed *et al.* données non publiées ; Goergen, données non publiées). La normalisation des protocoles d'élevage de ces parasitoïdes sur *S. frugiperda* et l'évaluation de leur efficacité sont en cours. Outre les avantages des parasitoïdes, la présence d'insectes prédateurs des œufs et des larves est importante pour maintenir la population de chenille légionnaire d'automne en dessous du seuil économique. Par exemple, le perce-oreille *Doru luteipes* (Scudder) pond ses œufs à l'intérieur du verticille de maïs, l'emplacement préféré de la chenille légionnaire d'automne (Reis *et al.* 1988), et se produit tout au long du cycle de culture du maïs. Les nymphes de *D. luteipes* consomment 8 à 12 larves par jour, alors qu'au stade adulte, elles consomment

quotidiennement 10 à 21 larves de *S. frugiperda* (Reis *et al.* 1988). Les milieux artificiels pour l'élevage du *D. luteipes* basés sur la farine des chrysalides d'insectes et le pollen ont été trouvés équivalents aux œufs de la chenille légionnaire d'automne (Pasini *et al.*, 2007). Plusieurs espèces de perce-oreilles sont également fréquemment observées dans le verticille et les épis de maïs en Afrique. Les perce-oreilles sont souvent évalués comme prédateurs des foreurs de tiges et des pucerons dans le maïs en Afrique. Parmi eux, *Diaperasticus erythrocephalus* (Olivier) est fréquemment observé. Le potentiel de prédation de ces perce-oreilles sur les œufs et les larves de la chenille légionnaire d'automne nécessite d'être évalué en détail. Des études de laboratoire et de terrain sur d'autres insectes bénéfiques identifiés associés aux ravageurs du maïs démontrent la réelle possibilité d'avoir une gestion durable des ravageurs du maïs basée sur des stratégies de lutte biologique.

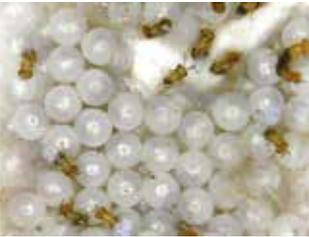
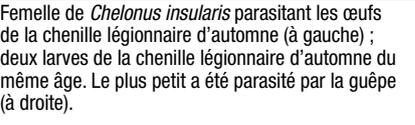
Dans les situations où la présence d'agents de lutte biologique n'est pas encore au niveau optimal et où des traitements pesticides pourraient être recommandés, l'utilisation de micro-organismes tels que *Baculovirus* ou *Bacillus thuringiensis* devrait être envisagée (Valicente et Cruz, 1991 ; Cruz 2000 ; Cruz *et al.* 2002 ; Figueiredo *et al.* 2009 ; voir Section 3.2).

3. Comment reconnaître les ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne

3.1. Insectes

Le Tableau 1 décrit le principal groupe d'ennemis naturels associés à la chenille légionnaire d'automne pour aider le producteur à identifier les éventuels ennemis naturels des ravageurs dans les différents pays où le ravageur est déjà présent.

Tableau 1. Résumé des parasitoïdes et des prédateurs contre la chenille légionnaire d'automne.

Nom scientifique & famille	Description	Photo
Parasitoïdes de la chenille légionnaire d'automne		
Parasitoïdes des œufs		
<i>Trichogramma pretiosum</i> (Riley) (Trichogrammatidae) ^a	<ul style="list-style-type: none"> Les espèces de <i>Trichogramma</i> sont de très, petits insectes, avec des dimensions <1 mm. <i>T. pretiosum</i> est utilisé dans le contrôle des œufs de la chenille légionnaire d'automne et <i>Helicoverpa</i> spp. 	
<i>Trichogrammatoidea armigera</i> (Nagaraja) (Trichogrammatoidea) ^b	<ul style="list-style-type: none"> Petits insectes (< 1 mm) avec des femelles plus grandes que les mâles. <i>T. armigera</i> sert à contrôler les œufs d'<i>Helicoverpa armigera</i> et de la chenille légionnaire d'automne. <i>T. armigera</i> est en production de masse au laboratoire d'ICRISAT-Niger. 	
<i>Telenomus remus</i> (Nixon) (Hymenoptera: Scelionidae) ^c	<ul style="list-style-type: none"> Measure entre 0,5 et 0,6 mm de long et a un corps noir et brillant. Présente une grande spécificité pour la chenille légionnaire d'automne. Chaque femelle parasite plus de 250 œufs pendant sa durée de vie. La période de développement total de la ponte des œufs à l'émergence de l'adulte est de 10 jours. 	
Parasitoïdes ovo-larvaires		
<i>Chelonus insularis</i> Cresson (Hymenoptera: Braconidae) ^d	<ul style="list-style-type: none"> A une taille d'environ 20 mm. Parasitoïde très compétitif, généralement prédominant dans les champs de maïs. 91 % du parasitisme naturel trouvé dans les échantillons du champ de maïs était attribuable au <i>C. insularis</i>. Parmi les agents de lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne, il appartient aux plus géographiquement répandus, communs aux États-Unis et à travers l'Amérique du Sud. Le <i>C. insularis</i> a été trouvé en Afrique du Sud et en Égypte (CABI). Un œuf de la chenille légionnaire d'automne parasité éclot, donnant naissance à une chenille transportant en son sein le parasitoïde. La période larvaire du parasitoïde a une durée moyenne de 20,4 jours, près de celle d'une chenille saine. Cependant, le ratio entre la consommation foliaire de chenilles saines et parasitées est de 15:1, ce qui signifie moins de dommages sur la plante. 	

Nom scientifique & famille	Description	Photo
Larval Parasitoids		
<i>Campoletis sonorensis</i> (Cameron) (Hymenoptera: Ichneumonidae) ⁶	<ul style="list-style-type: none"> • L'envergure des ailes de l'insecte est d'environ 15 mm. • Les larves de troisième stade sont les plus appropriées pour le parasitoïde. Le cycle total du parasitoïde est d'environ 22,9 jours. • Le ratio de consommation entre une chenille saine et une chenille parasitée est de 14,4:1. Par conséquent, en parasitant les chenilles de petite taille, en plus d'être efficace pour causer la mort de l'insecte hôte, le parasitoïde réduit considérablement la consommation foliaire de la chenille. • La peau de la larve la chenille légionnaire d'automne morte à côté du cocon du parasitoïde, caractéristique de cette espèce. 	 <p>Couple <i>Campoletis flavicincta</i> (à gauche) ; femelle parasitant la larve de la chenille légionnaire d'automne (à droite).</p>  <p>La pupa de <i>C flavicincta</i> et les restes d'une larve de la chenille légionnaire d'automne parasitée (en bas).</p>
<i>Cotesia icipe</i> (Fernández-Triana & Fiaboe) ¹¹	<ul style="list-style-type: none"> • Connu pour parasiter plusieurs espèces de <i>Spodoptera</i> en Afrique, y compris la chenille légionnaire d'automne. • Dans des conditions de laboratoire > 50% du parasitisme a été observé sur la chenille légionnaire d'automne. 	 <p><i>Cotesia icipe</i>, à la recherche d'une larve de la chenille légionnaire d'automne (Source: Faris Samira Mohamed, ICIPE).</p>
<i>Habrobracon hebetor</i> (Say) (Hymenoptera: Braconidae) ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Une petite guêpe, qui a été utilisée contre le mineur du millet à chandelle, attaque également les larves de FAW dans des conditions de laboratoire. • Ces parasitoïdes sont élevés dans le laboratoire d'ICRISAT et de l'INRA au Niger, et d'ISRA au Sénégal sur les larves de <i>Corcyra cephalonica</i> et lâchés dans les champs de millet à chandelle au Niger et au Sénégal. • En Afrique, ce parasitoïde se trouve en Algérie, au Burkina Faso, en Egypte, en Libye, à Madagascar, au Niger, au Sénégal, en Afrique du Sud, au Zimbabwe et à Maurice (CABI). 	 <p><i>Habrobracon hebetor</i> parasitant les larves de la chenille légionnaire d'automne.</p>
<i>Winthemia trinitatis</i> (Thompson) (Diptera: Tachinidae) ¹	<ul style="list-style-type: none"> • La femelle dépose ses œufs sur le corps près de la tête des larves du 5^{ème} et 6^{ème} stades de la chenille légionnaire d'automne, les rendant du coup impossible à enlever. Les larves du parasitoïde pénètrent le corps de la larve, retardent la pupaison et infligent jusqu'à 30% de parasitisme. • Tout en agissant sur des stades plus développés qui ont déjà causé des dommages à la plante, ces tachinoïdes contribuent à réduire les futures générations de ravageurs. 	 <p>Mouche Tachinidés <i>Winthemia trinitatis</i> pondant sur la larve de la chenille légionnaire d'automne (à gauche) et des œufs sur le corps hôte (à droite).</p>

Nom scientifique & famille	Description	Photo
Larval-Pupal Parasitoïdes		
<i>Archytas marmoratus</i> (Townsend) (Diptera: Tachinidae) ^k	<ul style="list-style-type: none"> Un parasitoïde silidairre larvo-pupal de plusieurs espèces de Noctuidae dont la chenille légionnaire d'automne. A un cycle de vie complexe qui lui permet de parasiter une large gamme de stades larvaires de l'hôte. La femelle ne pond pas directement les œufs sur l'hôte, mais en dépose plusieurs à leur proximité. Les œufs éclosent rapidement et les jeunes larves émergent. Le parasitisme survient lorsque ces larves rencontrent un hôte et pénètrent le corps de l'hôte. Puisque la femelle de <i>A. marmoratus</i> pond plusieurs œufs en même temps à plusieurs endroits, la probabilité de superparasitisme est très élevée. Souvent 75 % de la larve parasitée est surparasitée. La survie du parasitoïde diminue significativement si plus de quatre asticotes parasitoïdes sont observés dans une seule chenille hôte. Le taux de lâcher de <i>A. marmoratus</i> doivent donc être optimisés pour réduire le taux de superparasitisme (Carpenter & Proshold 2000). Des protocoles d'élevage de masse pour l'<i>A. marmoratus</i> sur la chenille des épis du maïs, <i>Helicoverpa zea</i> (Boddie) et le plus grand ver de la cire, <i>Galleria melonella</i> (L.) ont été normalisés (Gross & Johnson 1985 ; Bratti, 1993). 	 <p><i>Archytas marmoratus</i>.</p>
<i>Lespesia archippivora</i> (Riley) (Diptera: Tachinidae) ^j	<ul style="list-style-type: none"> Un parasitoïde généraliste capable de parasiter au moins 25 espèces de lépidoptères. Une femelle peut pondre entre 15 et 204 œufs au cours de sa durée de vie. Les femelles pondent sur le dos de la chenille. Trois stades de <i>Lespesia archippivora</i> se nourrissent de la chenille hôte et à l'échéance le parasitoïde émerge de la larve et se transforme en pupes dans le sol. L'adulte émerge de la puppe à environ 10 à 14 jours de l'oviposition. 	 <p><i>Lespesia archippivora</i> (Source: CBG Groupe de photographie, Centre de biodiversité génomique).</p>

Notes sur les parasitoïdes des œufs et des ovo-larvaires

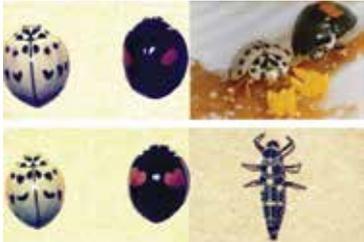
- Les parasitoïdes d'œufs sont considérés comme les plus importants parmi les agents de lutte biologique. Ces espèces empêchent le ravageur de causer des dommages à la plante hôte. En outre, ces parasitoïdes ont été facilement élevés à grande échelle et sont donc commercialement disponibles dans des usines biologiques dans plusieurs pays.
- La femelle *Trichogramma* pond à l'intérieur de l'œuf de son hôte. En quelques heures, sa larve émerge et se nourrit du contenu de l'œuf de l'hôte. Le cycle entier du parasitoïde se déroule à l'intérieur de l'œuf parasitaire. Peu après l'émergence, la guêpe adulte commence immédiatement le processus de recherche d'une nouvelle masse d'œufs, qui continue la multiplication de l'espèce. Le cycle de vie complet du parasitoïde est d'environ 14 jours.
- Pour le maïs, il est recommandé 100 000 parasitoïdes adultes par hectare, lâchés à environ 40 points. L'efficacité sur le terrain, la capacité d'élevage à l'échelle commerciale et la compétitivité des prix sont les principales raisons d'utilisation du *Trichogramma* comme agent principal de lutte biologique dans une méthode de lâcher inondatif.
- La présence d'écailles/poils au-dessus des masses d'œufs constitue une barrière contre le parasitisme du *Trichogramma* spp. Cette difficulté peut être surmontée en utilisant un parasitoïde plus agressif capable de briser la barrière physique. Il est donc nécessaire de connaître les espèces/souches présentes dans l'agroécosystème lors de la sélection de l'espèce de *Trichogramma* à utiliser pour la lutte biologique appliquée à la chenille légionnaire d'automne.
- Il existe 12 espèces de *Telenomus* et 27 espèces de *Trichogramma/Trichogrammatoidea* trouvées en Afrique, ce qui indique l'adaptabilité de ces genres dans le continent.
- Une espèce de *Trichogramma/Trichogrammatoidea* a été collectée des œufs de la chenille légionnaire d'automne au Niger. Vingt-quatre laboratoires publics et privés en Égypte produisent *Trichogramma* spp. et d'autres ennemis naturels. Le Laboratoire d'entomologie économique de l'Université du Caire produit *T. achaeae*, *T. euproctidis*, *Chrysoperla* sp., *Orius* sp. et des coccinellidés à grande échelle pour la recherche et la distribution. Le laboratoire est capable de dispenser une formation sur la culture de masse de ces ennemis naturels. En 2016, le laboratoire a formé des techniciens du Mali et du Niger sur la production de masse de *Trichogramma* spp.
- L'utilisation de *Telenomus* dans le contrôle de la chenille légionnaire d'automne suit la même dynamique que *Trichogramma* mais est utilisée à une quantité de 60 000 insectes par hectare. On a trouvé une espèce de *Telenomus* parasitant 60 % des œufs de la chenille légionnaire d'automne au Niger (ICRISAT).

Notes sur les parasitoïdes larvaires

- *Cotesia marginiventris* a été trouvée en République Centrafricaine et en Égypte (CABI). Accidentellement, *C. marginiventris* a été introduit au Cap Vert avant 1981 où il s'est établi sur *Helicoverpa armigera*, *Trichoplusia ni* et *Chrysodeixis chalcites* (Lima et van Harten, 1985 ; van Harten 1991).
- Plusieurs autres espèces d'*Ichneumonidae*, parasitoïdes larvaires, sont courantes dans des échantillons de larves de la chenille légionnaire d'automne collectés dans différentes régions de production de maïs au Brésil, indiquant leur potentiel pour être utilisé dans les programmes de lutte biologique. Par exemple, *Eiphosoma laphygmae*, *Ophion flavidus* et *Colpotrochia mexicana* causent une réduction importante de consommation par le ravageur, réduisant ainsi le risque de pertes économiques. En plus de *O. flavidus*, *Aleiodes laphygmae* (Braconidae), *Météorus* spp. (Braconidae) et *Euplectrus platyhypenae* (Eulophidae) attaquent également les larves de la chenille légionnaire d'automne (p. ex. Meagher *et al.* 2016).

Notes sur certains parasitoïdes pupaux

Cinq espèces d'*Ichneumonidae*, *Diapetimorpha introit*, *Cryptus albitarsis*, *Ichneumon promissorius*, *Ichneumon ambulatorius* et *Vulgichneumon brevicinctor* ; deux espèces de Chalcididae, *Brachymeria ovata* et *B. robusta* ; et une espèce de Eulophidae, *Trichospilus pupivora*, ont également été signalée sur les pupes de la chenille légionnaire d'automne aux États-Unis, en Argentine et au Barabas.

Nom scientifique & famille	Description	Photo
Insectes prédateurs de la chenille légionnaire d'automne		
<p><i>Coleomegilla maculata</i> (De Geer) (Coleoptera: Coccinellidae) Coccinelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les adultes mesurent 6 mm de longueur et sont généralement rouges avec six taches noires sur chaque élytre. • Les femelles déposent des amas de 10 à 20 œufs jaunes sur les plantes. • Les adultes et les larves se nourrissent de pucerons, d'acariens, d'œufs, et de larves des divers insectes telle que la chenille légionnaire d'automne. • Les spores polliniques et fongiques sont aussi des composants importants du milieu alimentaire de cette espèce. 	 <p><i>Coleomegilla maculata</i> (adultes, œufs, larve et pupe).</p>
<p><i>Hippodamia convergens</i> (Guérin-Méneville) (Coleoptera: Coccinellidae) Coccinelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les adultes mesurent environ 6 mm de longueur et ont des élytres de couleur orange, typiquement avec 6 petites taches noires sur chacun. • La section du corps derrière la tête est noire avec les bords blancs et deux lignes blanches convergentes. • Les femelles déposent des amas de 10 à 20 œufs de couleur jaune sur les plantes. • La larve croît en quatre étapes. 	 <p><i>Hippodamia convergens</i>.</p>
<p><i>Olla v-nigrum</i> (Mulsant) (Coleoptera: Coccinellidae) Coccinelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les adultes sont d'abord de couleur claire, et avec le temps, deviennent plus foncés. • Les adultes sont de deux couleurs différentes. L'adulte de couleur noire acquiert une couleur noire brillante, tandis que les taches de leurs élytres deviennent orange. L'adulte de couleur jaune montre une légère augmentation de sa tonalité, tandis que les taches situées le long de ses élytres deviennent noires. • Un prédateur efficace, tant au stade larvaire qu'adulte. • La moyenne des œufs par ponte est d'environ 21. Le cycle complet de l'œuf au stade adulte dure environ 20 jours. 	 <p><i>Olla v-nigrum</i>.</p>
<p><i>Cycloneda sanguinea</i> (L.) (Coleoptera: Coccinellidae) Coccinelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un insecte rouge sans taches sur les élytres des adultes mais deux taches noires sur la zone claire de la tête. • La femelle pond ses œufs dans la plante hôte, en groupes, chacun contenant environ 20 œufs jaunâtres. • L'insecte passe par quatre stades nymphaux. La période larvaire dure au moins environ 8 jours. Le cycle de la larve au stade adulte est d'environ 15 jours. • La larve et l'adulte sont tous deux des prédateurs. 	 <p><i>Cycloneda sanguinea</i>.</p>

Nom scientifique & famille	Description	Photo
<p><i>Doru luteipes</i> Scudder (Dermaptera: Forficulidae) Perce-oreille^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'un des ennemis naturels les plus importants de la chenille légionnaire d'automne. Les études écologiques et biologiques sur le prédateur, se nourrissant des larves de chenille légionnaire d'automne, montrent que le nombre d'œufs par ponte est de 25 à 30, avec une période d'incubation d'environ 1 semaine. • La phase nymphale comprend quatre stades, allant de 37 à 50 jours. • Les adultes avec des cribles à l'extrémité de l'abdomen peuvent vivre jusqu'à 1 an. 	 <p><i>Doru luteipes.</i></p>
<p><i>Euborellia annulipes</i> (Lucas) (Dermaptera: Carcinophoridae) Perce-oreille^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En été, la période d'incubation est de 7 jours. Le temps de l'œuf à l'émergence de l'adulte est d'environ 60 jours. • Les œufs nouvellement déposés sont ovales, de couleur crème jaunâtre, de 0,95 mm de longueur et de 0,75 mm de diamètre. Les nymphes nouvellement écloses ont une coloration blanche, des yeux noirs et un abdomen noir ou brun. Quand ils deviennent adultes, la coloration initiale est blanche, puis devient foncée. • Les insectes n'ont pas d'ailes. 	 <p><i>Euborellia annulipes.</i></p>
<p><i>Zelus longipes</i> (L.) <i>Zelus leucogrammus</i> (Perty) <i>Zelus armillatus</i> (Lepeletier & Serville) (Hemiptera: Reduviidae) Punaise assassine^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le genre <i>Zelus</i> est l'un des punaises les plus courants du maïs qui tuent. • La longueur moyenne des adultes est de 1,3 à 1,9 cm. • Brun ou noirâtre en couleur, et communément trouvé dans les champs de maïs. • Habituellement a une longue et étroite tête avec un cou distinct derrière les yeux, qui sont souvent rougeâtres. • Les femelles pondent les œufs en groupes sur les feuilles des plantes ou même sur le sol. Les nymphes ressemblent à un adulte mais sans aile. 	 <p><i>Zelus</i> spp.: adultes et masses d'œufs (en haut à droite).</p>
<p><i>Geocoris punctipes</i> (Say) (Hemiptera: Lygaeidae) Punaise aux gros yeux^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Petits insectes (environ 4 mm de longueur) présents dans de nombreuses régions du monde. • Généralement considérées comme bénéfiques parce qu'ils attaquent divers ravageurs, y compris les insectes et les acariens dans les cultures ornementales et agricoles. • Prédateur très commun des espèces de Lépidoptères. 	 <p>Punaise aux gros yeux <i>Geocoris punctipes</i> (Lygaeidae) (en haut à gauche) <i>Orius insidiosus</i> (Anthocoridae) (en bas à gauche) ; <i>Nabis</i> sp. (<i>Nabidae</i>) (à droite).</p>
<p><i>Orius insidiosus</i> Say (Hemiptera: Anthocoridae) Punaise des fleurs^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prédateur des petits arthropodes, tels que les thrips, les acariens, les aleurodes, les pucerons et les lépidoptères. • Espèces très abondantes avec un potentiel élevé d'utilisation dans les programmes de lutte biologique. 	
<p><i>Nabis rugosus</i> (L.) (Hemiptera: Nabidae) Punaise pirate^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prédateurs des pucerons, des œufs de papillon et des petites larves de lépidoptères. 	

Nom scientifique & famille	Description	Photo
<p><i>Podisus maculiventris</i> (Say) (Hemiptera: Pentatomidae) Spined soldier bug^w</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les <i>Podisus</i> spp. se trouvent dans différents écosystèmes, les nymphes et les adultes se nourrissent principalement de larves de lépidoptères. • Ils piquent leurs proies et injectent une toxine qui les paralyse en relativement peu de temps. La proie est tuée parce que ses fluides internes sont sucés par le prédateur. 	
<p><i>Calosoma granulatum</i> (Perty) (Coleoptera: Carabidae) Scarabes^a</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un scarabe verdâtre et iridescent (25 à 30 mm de longueur). • Les femelles accouplées pondent les œufs sur la surface du sol ou légèrement en dessous. La phase immature passe par trois stades, avant la pupaison dans le sol. • Les œufs sont jaunes légers. La phase larvaire est d'environ 12 jours. La longévité des adultes est d'environ 83 jours. 	

Podisus spp. (masses d'œufs, nymphes, et adultes se nourrissant de larve de chenille légionnaire d'automne).

Œufs and pupa (à gauche) ; adulte et larve de *Calosoma* sp. se nourrissant de larve de chenille légionnaire d'automne (à droite).

Note: Les références fournies ici sont représentatives pour chaque espèce.

^aButtler et Lopez (1980) ; ^bManjunath (1972) ; ^cPomari et al. (2013) ; ^dRezende et al. (1995a), Figueiredo et al. (2006a) ; ^eIsehour (1985) ; Figueiredo et al. (2006b) ; ^fJalali et al. (1990) ; ^gFiaboe et al. (2017) ; ^hLandge et al. (2009) ; ⁱSilva et al. (2010) ; ^jGross and Johnson (1985) ; ^kEtcheagaray et Nishida (1975) ; ^lLundgren et al. (2004) ; ^mCardoso et Lázari (2003) ; ⁿChazeau et al. (1991) ; ^oCardoso et Lázari (2003) ; ^pChoate (2001) ; ^qBharadwaj (1966) ; ^rCogni et al. (2000) ; ^sChamplain et Sholdt (1967) ; ^tColl et Ridgeway (1995) ; ^uTamaki et Weeks (1972) ; ^vMukerji et LeRoux (1965) ; ^wPasini (1995).

3.1.1. Etudes sur la convenance de l'hôte

La convenance est définie comme la capacité d'un hôte à conduire avec succès le développement d'un parasitoïde de l'œuf au stade adulte.

3.1.1.1. La convenance de l'hôte pour les parasitoïdes d'œufs

- Exposer 100 œufs à une jeune femelle accouplée dans un tube à essai.
- Après 6 heures d'exposition, retirez le parasitoïde femelle du tube et incubez les œufs à 25±1°C et 70±5% RH.
- Collecter les données sur les paramètres suivants: le parasitisme en pourcentage, l'émergence en pourcentage, le sexe ratio F 1 (pourcentage de femelles) et le temps de développement.

3.1.1.2. L'acceptabilité et La convenance de l'hôte pour les parasitoïdes des larves

- Sélectionnez les stades L2-L 5 pour ces expériences. Effectuez les expériences au laboratoire à 25±1°C, 50 à 70 % RH, et photopériode 12h:12 (L:O).
- Utilisez la technique de piqûre à la main, c'est-à-dire que vous offrez des larves maintenues dans une pince souple au parasitoïde femelle dans une cage avec un manchon. Un hôte est défini comme ayant été accepté lorsque le parasitoïde insère son ovipositeur. Vérifiez la ponte (c.-à-d. dépôts d'œufs) par la suite par dissection d'un sous-échantillon de larves.
- Mettez les larves examinées individuellement dans les tubes à essai contenant du milieu artificiel.
- Surveillez le sort des larves hôtes et des parasitoïdes quotidiennement. Seules les larves qui produisent des cocons sont considérées comme parasitées. Collecter le nombre d'hôtes qui meurent, qui produisent des cocons, qui se chrysalident ou qui donnent des papillons adultes. En outre, calculez l'émergence des parasitoïdes, la progéniture totale par larve hôte, le sexe-ratio (proportion de la progéniture féminine) et la mortalité des parasitoïdes. Lorsque ni les œufs ni les parasitoïdes morts ne sont trouvés, les larves sont considérées comme non parasitées.

3.1.1.3. Étude de la convenance de l'hôte sur des parasitoïdes des pupes

- i. Exposez les pupes de chenille légionnaire d'automne âgées d'un à cinq jours à un parasitoïde de pupes en libérant une femelle déjà accouplée mais pour une première fois dans le tube à essai. Bouchez le tube à essai avec du coton pour empêcher le parasitoïde de s'échapper.
- ii. Retirez le parasitoïde et les chrysalides après 6 heures. Placez tous les pupes de la chenille légionnaire d'automne exposées aux parasitoïdes femelles individuellement dans des tubes à essai pour évaluer la convenance de l'hôte. Bouchez les flacons avec du coton et maintenez la température à $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 50-70 % HR, et 12 h: 12h (L: O) de photopériode.
- iii. Vérifiez les pupes tous les jours pour l'émergence des papillons, l'émergence des parasitoïdes ou la mortalité des pupes. Enregistrer le temps de développement et le sexe des parasitoïdes adultes.

3.1.1.4. Étude de la convenance de l'hôte des prédateurs de la chenille légionnaire d'automne

- i. Placez les prédateurs potentiels individuellement dans des boîtes de Pétri contenant du coton humide et sans nourriture pendant 24 heures avant l'expérience.
- ii. Offrez aux prédateurs potentiels, préalablement enfermés dans des boîtes de Pétri, soit une masse d'œufs de chenille légionnaire d'automne, 20 larves au premier stade, 10 larves aux stades avancés (larves de 10 à 14 jours) ou cinq pupes dans des conditions de laboratoire ($25 \pm 1^\circ\text{C}$ et 70 ± 5 % RH).
- iii. Collecter les données sur la capacité d'acceptation et de consommation des proies après 24 heures.

3.2. Les entomopathogènes

3.2.1. Les virus

Parmi les agents de lutte microbienne, les insecticides à base de virus, principalement du groupe des Baculovirus, ont été identifiés comme présentant le plus fort potentiel de développement en insecticides biologiques en raison de leur spécificité, de virulence élevée de l'hôte et de leur innocuité maximale des vertébrés (Moscardi, 1999 ; Barrera *et al.* 2011). Deux types de Baculovirus ont été étudiés pour le contrôle du *S. frugiperda*, à savoir le granulovirus (SfGV) (Betabaculovirus) et multi-nucléopolyhédrovirus (SfMNPV) (Alphabaculovirus). Toutefois, le SfMNPV a un plus grand potentiel pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne (Behle et Popham, 2012 ; Gómez *et al.* 2013 ; Haase *et al.* 2015). Le SfMNPV est spécifique aux larves de la chenille légionnaire d'automne seules. Dans des conditions naturelles, le ravageur est infecté par voie orale en ingérant les aliments contaminés (feuille de maïs). Une fois ingérés, les corps d'inclusion polyédriques (CIP) se dissolvent dans le mésogastre alcalin, libérant les virions infectieux. Ces virions infectent les cellules de l'épithélium du mésogastre et se multiplient dans le noyau. En outre, le virus se propage à la cavité corporelle et infecte d'autres tissus tels que le tissu adipeux, l'épiderme, la matrice trachéale et même les glandes salivaires, le tube de Malpighi et les cellules sanguines, causant sa mort 6 à 8 jours après l'ingestion. Une chenille infectée par le nucléopolyhédrovirus ne consomme que 7% de la nourriture normalement consommée par une chenille saine (Valicente, 1988). Les symptômes de l'infection par le Baculovirus comprennent l'apparition d'imperfections, le jaunissement de la peau et la diminution de l'alimentation. Une larve infectée se déplace vers les parties supérieures de la plante et, à sa mort, pend la tête en bas, avec quelques fausses pattes encore attachées à la plante. Les larves mortes sont molles, de couleur foncée et se désintègrent facilement pour libérer les fluides corporels riches en polyèdres qui contribuent à la propagation du virus (Figure 1).

L'âge de la larve de la chenille légionnaire d'automne à l'infection, la quantité de virus ingérée, la virulence du virus et les conditions climatiques prédominantes, en particulier la température, l'humidité et le rayonnement solaire, sont des facteurs clés qui influent sur l'efficacité du virus et la rapidité de son élimination. Ces facteurs ont donc des effets marquants sur l'action du virus lorsqu'il est appliqué au champ. En outre, d'autres facteurs tels que le type d'équipement de pulvérisation, la formulation utilisée et le temps de pulvérisation influent également sur l'efficacité du virus (Hamm & Shapiro, 1992 ; Cisneros *et al.* 2002).

On obtient une meilleure efficacité du Baculovirus pour le contrôle de la chenille légionnaire d'automne lorsqu'il est appliqué sur les plants de maïs aux stades de 6 à 8 feuilles ou de 8 à 10 feuilles avec un pulvérisateur manuel à dos à pression entretenue en utilisant une formulation de poudre mouillable contenant la dose recommandée du produit ($2,5 \times 10^{11}$ FRP/ha) sur les larves nouvellement écloses, appliqué une fois ou à des intervalles d'une semaine. Une évaluation effectuée sept jours après l'application du virus indique une mortalité minimale des larves de 79,2 à 97,2 %. Dans une deuxième évaluation, effectuée trois jours après la deuxième application du virus, la mortalité variait entre 86,6 et 100%. L'efficacité virale n'a pas varié entre les deux stades de développements

des plants. Une formulation commerciale du nucléopolyhédrovirus (NPV) de la chenille légionnaire d'automne, SPOBIOL (préparée par CORPOICA, une société de recherche para-publique colombienne) est disponible et a été autorisée par Certis LLC, une société américaine (voir la Section 7 pour une méthode de production à petite échelle).

Il faut également considérer que, à mesure que la chenille se développe, elle devient plus résistante aux virus. Par conséquent, plus les larves sont jeunes, plus l'efficacité du virus est élevée. Il est donc recommandé d'appliquer le Baculovirus aux larves d'une taille maximale de 1,5 cm. La pulvérisation est effectuée avec le même équipement utilisé pour l'application d'un produit chimique conventionnel. Pour la chenille légionnaire d'automne en particulier, il est recommandé d'utiliser une buse de ventilateur (8004 ou 6504). Plus la plantation est uniforme, plus l'application est efficace avec des pulvérisateurs à dos ou des pulvérisateurs motorisés. Il faut tenir compte des buses appropriées afin de faciliter une application uniforme avec le type de pulvérisateur utilisé. Des formulations améliorées de SfMNPV avec de la farine de maïs et 1% d'acide borique (Cisneros et al. 2002) et une microencapsulation (Gómez *et al.* 2013) sont efficaces pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne.

En dépit de divers développements en termes de multiplication *in vitro* des baculovirus, la production à grande échelle de baculovirus comme biopesticide commercial a été toujours basée sur la multiplication *in vivo* chez les insectes hôtes en raison du coût significativement faible et de la nature moins technologique de la production. Des facteurs tels que la capacité à maintenir une colonie malade de l'insecte hôte, l'âge de la chenille lorsqu'elle est exposée à l'agent pathogène, la température à laquelle la colonie infectée est maintenue, la concentration de l'inoculum du virus utilisé, la composition nutritionnelle du milieu artificiel des larves, et la mécanisation/disponibilité de la main d'œuvre sont certains des facteurs critiques qui régissent l'efficacité de la production du Baculovirus (Moscardi 1999 ; Subramanian et al. 2006 ; Moscardi *et al.* 2011 ; Paiva 2013). La nature cannibalistique de la chenille légionnaire d'automne s'ajoute à la complexité de la production de SfMNPV. L'inoculation de larves âgées de 8 jours avec 1×10^7 CIP/ml et maintenue à 25 °C est optimale pour maximiser le rendement de SfMNPV. Le coût du produit bio-pesticide qui en résulte dépend en grande partie du coût du maintien d'une colonie exempte de maladie. L'utilisation des milieux naturels tels que les feuilles du ricin pour l'élevage de SfMNPV peut réduire considérablement le coût de production ; toutefois, un tel système est largement sujet à la contamination due à des virus/ microsporidiens étrangers. Une production «*in situ*» au champ utilisant l'infection des larves collectées au champ a été mise au point pour les *Spodoptera exempta* nucléopolyhédrovirus (spexnpv) en Tanzanie, en Afrique. Les premières périodes de fortes attaques par la chenille légionnaire africaine sont traitées avec de puissants SpexNPV. Les insectes malades sont récoltés, formulés à l'aide d'une préparation à base de kaolin et utilisés pour traiter les périodes de fortes attaques subséquentes (Mushobozi *et al.*, 2006).

3.2.2. Les champignons entomopathogènes

Les champignons entomopathogènes (CEP) ont un large spectre d'action avec la capacité d'infecter plusieurs espèces d'insectes et à différents stades, causant des épizooties dans des conditions naturelles (Alves *et al.* 2008). Les spores de champignons infectent par le biais du tégument, se multiplient dans divers tissus au sein de l'insecte et tuent l'insecte grâce à la destruction des tissus et à la production de toxines. L'induction des épizooties dépend des facteurs climatiques tels que le vent, la pluie ou la fréquence des contacts entre les insectes. Les insectes infectés cessent de se nourrir, se décolorent (crème, vert, rougeâtre ou brun) et finissent par mourir comme cadavres calcinés durs à partir desquels le champignon sporule. L'humidité est nécessaire au succès des champignons en tant qu'agent de lutte biologique. *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* et *Nomuraea rileyi* sont les champignons communs pouvant être utilisés contre les insectes ravageurs.

Beauveria bassiana a été utilisée dans le contrôle des *Spodoptera* (p. ex. Fargues et Maniana, 1992). Comparativement aux autres ravageurs des lépidoptères, les larves de la chenille légionnaire d'automne semblent être moins sensibles à *Beauveria bassiana* (Wraight *et al.* 2010). Plusieurs isolats fongiques appartenant à trois genres différents (*Metarhizium*, *Beauveria* et *Isaria*) ont été examinés pour l'efficacité contre les larves de deuxième stade de *S. frugiperda* à CIPE, mais un seul isolat de *B. bassiana* a pu causer une mortalité modérée de 30% (Akutse *et al.* Données non publiées). Des efforts sont actuellement en cours pour étudier les isolats des champignons entomopathogènes quant à leur efficacité contre d'autres stades de vie de la chenille légionnaire d'automne tels que les adultes et les œufs.

3.2.3. Les Bactéries

Parmi les divers biopesticides utilisés pour lutter contre les insectes, les biopesticides de *Bacillus thuringiensis* (Bt) Berliner sont les plus largement utilisés. Ce sont des bactéries omniprésentes, de bactéries gram-positives et terricoles, qui produisent des protéines cristallines nommées delta-endotoxines, qui sont insecticides. Ces endotoxines présentent des niveaux relatifs de spécificité à certains groupes d'insectes. Bien qu'il existe plusieurs produits commerciaux Bt disponibles sur le marché pour la lutte contre les lépidoptères, seuls quelques-uns sont efficaces dans la lutte contre la chenille légionnaire d'automne. Parmi les diverses souches de Bt, la chenille légionnaire d'automne est plus sensible à Bt aizawai et à Bt *thuringiensis* (Polanczyk et al. 2000), et non à Bt *kurstaki*, qui est efficace contre de nombreux autres ravageurs lépidoptères (Silva et al. 2004). D'autres aspects tels que la susceptibilité de l'endotoxine aux UV, l'incapacité à atteindre les ravageurs et la consommation de toxines, ainsi que le coût élevé de la production limitent leur adoption et leur utilisation. Plusieurs groupes de recherche ont poursuivi les efforts visant à détecter les souches efficaces de Bt contre la chenille légionnaire d'automne. Des variations entre les populations de la chenille légionnaire d'automne dans leur susceptibilité aux différentes toxines Cry ont également été observées (Monnerat et al. 2006), ce qui doit être envisagé lors du choix des bio-pesticides à base de Bt pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne dans différentes régions. Avec l'objectif de développement de bio-pesticides à base de Bt en l'Afrique, les souches de 19 Bt ont été examinées par rapport aux larves de deuxième stade de chenille légionnaire d'automne à ICIPE. Sept souches Bt ont été très efficacement, causant une mortalité de 100% 7 jours après le traitement, avec des valeurs de mortalité du temps léthal 50 (LT 50) comprises entre $2,33 \pm 0,33$ et $6,50 \pm 0,76$ jours (Akutse et al. données non publiées). Une nouvelle caractérisation biologique et moléculaire de ces isolats est actuellement en cours. La production en masse de biopesticides à base de Bt a été entreprise à l'aide de la technologie de fermentation, aussi bien sous forme de fermentation liquide que semi-solide ou de fermentation à l'état solide (Fontana Capalbo et al. 2001). Outre les toxines Cry, la chenille légionnaire d'automne est également sensible à certaines protéines à effet insecticides d'origine végétale trouvées dans les surnageants de culture du Bt (Barreto et al. 1999). Les bio-pesticides commerciaux Bt de la souche Bt aizawai sont enregistrés et disponibles dans une certaine mesure en Afrique. L'efficacité de ces bio-pesticides contre les chenilles Légionnaires d'automne en Afrique doit être évaluée.

3.2.4. Nématodes entomopathogènes

L'une des stratégies les moins explorées mais prometteuses en matière de lutte biologique est l'utilisation de nématodes entomopathogènes (NEP), en particulier *Heterorhabditis bacteriophora*, *Heterorhabditis indica* et *Steinernema carpocapsae*. Ceux-ci se sont révélés être des alternatives aux pesticides chimiques, respectueuses de la santé humaine et environnementale pour la lutte contre de nombreux insectes ravageurs du sol, y compris les chenilles légionnaires. Il est rapporté que la chenille légionnaire d'automne est très sensible à ces nématodes bénéfiques au taux de 23 000 nématodes par mètre carré pour cibler les larves jeunes et matures. Les nématodes bénéfiques doivent être répandus tôt le matin ou tard la nuit lorsque les larves de la chenille légionnaire sont très actives et peuvent facilement être trouvées par les nématodes. Un autre avantage de l'épandage de nématodes durant ces périodes est la faible exposition des nématodes aux UV, car ils peuvent mourir instantanément en cas d'exposition aux rayons UV (Shapiro-Ilan et al. 2006).

De même, Garcia et al. (2008) ont signalé que 280 juvéniles infectieux de *Steinernema spp.* ont été nécessaires pour tuer 100% de chenille légionnaire d'automne du troisième stade dans des boîtes de Pétri, contre 400 juvéniles infectieux du nématode *H. indica* pour obtenir 75 % de lutte contre la chenille légionnaire d'automne. Il est possible de pulvériser des Nématodes entomopathogènes (NEP) sans perte significative de leur concentration et de leur viabilité, avec des équipements qui produisent des charges électriques au mélange pulvérisé, et avec ceux utilisant des astuces hydrauliques et rotatives. Les concentrations de juvéniles infectieux des nématodes *H. indica* et *Steinernema sp.* ont été réduits de 28% et 53% respectivement lorsque les buses de pulvérisation hydraulique nécessitant des éléments filtrants de maille 100-ont été utilisées. De plus, Molina-Ochoa et al. (1999) ont signalé plus tôt que *Steinernema carpocapsae* et *S. riobravis* sont très efficaces dans la lutte contre les pré-pupes de la chenille légionnaire d'automne. Les auteurs ont démontré que le mélange de NEP et de soies de maïs matures pourrait améliorer la mortalité des pré-pupes de chenille légionnaire d'automne et pourrait être utilisée pour la lutte intégrée contre ce ravageur. Negrisoli et al. (2010 a) ont indiqué que plusieurs insecticides commerciaux étaient compatibles avec les trois espèces de NEP dont *Heterorhabditis indica*, *Steinernema carpocapsae* et *Steinernema glaseri* dans des conditions de laboratoire. Il a également été signalé que l'efficacité de *H. indica* contre la chenille légionnaire d'automne était renforcée lorsqu'elle est mélangée avec un insecticide, le *Lufenuron* (Negrisoli et al. 2010 b). Toutefois, il est nécessaire d'étudier et d'évaluer la compatibilité des insecticides, y compris les bio-pesticides et les NEP, avant de recommander leur utilisation dans un programme de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne.

Selon Kaya *et al.* (2006), le continent africain offre un grand potentiel d'occurrence et d'exploration des NEP, mais seulement quelques pays ont fait l'objet d'une étude jusqu'à présent. Des travaux approfondis sur les nématodes ont été effectués sur la survie, l'infectiosité et la virulence en Égypte et ces études ont montré des résultats prometteurs pour le développement et l'incorporation des NEP dans les programmes de lutte intégrée contre les ravageurs dans certains systèmes de culture en Égypte. Bien que certaines études aient rapporté une lutte efficace contre les ravageurs en utilisant des NEP, un succès limité au champ a été révélé contre le lépidoptère foreur de tige de la canne à sucre *Eldana saccharina*, en Afrique du Sud. L'échec a été attribué à la nature cryptique des larves et des chiures/sèves au niveau des sites infestés des tiges infestées. Bien que des applications commerciales n'aient pas encore été signalées en Afrique, il est nécessaire de se lancer dans les recherches actives sur les NEP et d'explorer le potentiel et l'adéquation des NEP pour les plans de lutte biologique et les programmes lutte intégrée contre les ravageurs.

3.3. Pesticides botaniques

Les pesticides d'origine végétale sont communément appelés pesticides botaniques. Une grande diversité de plantes ont des propriétés insecticides et certaines d'entre elles ont été utilisées pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Amérique (Tableau 2). Les pesticides botaniques sont bio-dégradables, respectueux de l'environnement, moins nocifs pour les producteurs et les consommateurs, et souvent sans dangers pour les ennemis naturels et, par conséquent, peuvent être utilisés dans des stratégies de lutte intégrée contre le ravageur basé sur la lutte biologique. De plus, sur la base de la disponibilité des plantes à effets pesticides dans l'écosystème, les pesticides botaniques pourraient être facilement préparés par les petits producteurs agricoles.

Tableau 2. Pesticides botaniques potentiels contre la chenille légionnaire d'automne, sur la base des études en Amérique.

Espèces	Famille	Extrait	Mode d'action	Référence
<i>Neem: Azadirachta indica</i>	Meliaceae	0,25% huile de margousier	Larvicide avec une mortalité en laboratoire allant jusqu'à 80%	Tavares <i>et al.</i> (2010)
<i>Aglaiia cordata Hiern</i>	Meliaceae	Hexane et éthanol extraits de graines	Larvicide avec une mortalité en laboratoire allant jusqu'à 100%	Mikolajczak <i>et al.</i> (1989)
<i>Annona mucosa Jacquin</i>	Annonaceae	Extrait éthanolique à partir des graines	Inhibition de la croissance larvaire	Ansante <i>et al.</i> (2015)
<i>Vernonia holosenicea, Lychnophora ramosissima, et Chromolaena Chaseae</i>	Asteraceae	Ethanol extrait des feuilles	Ovicide	Tavares <i>et al.</i> (2009)
<i>Cedrela salvadorensis et Cedrela Dugessi</i>	Meliaceae	dichlorométhane extrait de bois	Régulation de la croissance des insectes (RIG) et larvicide avec une mortalité allant jusqu' à 95%	Céspedes <i>et al.</i> (2000)
<i>Myrtillocactus geometrizans</i>	Cactaceae	Méthanol extrait des racines et d'autres parties aériennes	Régulation de la croissance des insectes (RIG), larvicides, pupaison retardée	Céspedes <i>et al.</i> (2005)
Poivre long, <i>Piper hispidinervum</i>	Piperaceae	Huiles essentielles extraites des graines	Affecte la spermatogenèse et donc la ponte	Alves <i>et al.</i> (2014)
<i>Melia azedarach</i>	Meliaceae	Extrait éthanolique des feuilles	Empêche la larve de se nourrir ; synergie avec les pesticides	Bullangpoti <i>et al.</i> (2012)
<i>Jatropha gossypifolia</i>	Euphorbiaceae	éthanol extrait des feuilles	Empêche la larve de se nourrir ; synergique avec les pesticides	Bullangpoti <i>et al.</i> (2012)
<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	huile de ricin et Ricinine (extraits de graines)	Inhibition de la croissance et larvicide	Ramos-López <i>et al.</i> (2010)

L'utilisation des plantes dans la lutte contre les ravageurs est une pratique culturelle des petits producteurs agricoles en Afrique, qui pourrait constituer un arsenal dans la lutte contre la chenille légionnaire d'automne. Plusieurs extraits de plantes ont des propriétés insecticides contre des foreurs de tiges qui infestent des céréales en Afrique. Parmi ceux-ci figurent: le margousier (*Azadirachta indica*), le lilas persan (*Melia azedarach*), le pyrèthre (*Tanacetum cinerariifolium*), l'acacia (*Acacia sp.*), le bonnet d'évêque (*Tephrosia vogelii*), le tagète sauvage (*Tagetes minuta*), la sauge sauvage (*Lantana camara*), le poivre des Achantis (*Piper guineense*), la pourghère (*Jatropha curcas*), le paprika (*Capsicum sp.*), l'oignon (*Allium sativum, Allium cepa*), la citronnelle (*Cymbopogon citratus*), le tabac (*Nicotiana sp.*), le chrysanthème (*Chrysanthemum sp.*), et le tournesol sauvage (*Tithonia diversifolia*) (Ogendo *et al.* 2013 ; Mugisha-Kamatenesi *et al.* 2008 ; Stevenson *et al.* 2017).

L'efficacité de ces plantes à propriété insecticide contre les chenilles légionnaires d'automne doit être rapidement évaluée et disséminées celles efficaces aux producteurs de maïs en Afrique. Des preuves préliminaires indiquent la propriété insecticide des graines et des extraits foliaires de margousier, Melia et Pyrèthre contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique, dont il faut explorer davantage.

4. Protocole de suivi des agents de lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne

Étant donné que la lutte biologique est une stratégie importante dans la lutte contre la chenille légionnaire d'automne, et que cette dernière est probablement présente dans certains pays africains depuis un certain temps, il est probable que les espèces endémiques de lutte biologique, principalement les parasitoïdes, aient déjà commencé à utiliser la chenille légionnaire d'automne comme hôte. Par conséquent, un protocole pour l'identification des agents de lutte biologique de la chenille légionnaire d'automne dans le champ de maïs sera abordé ci-dessous.

4.1. Les parasitoïdes

- Ce protocole devrait être appliqué de préférence pendant au moins trois années consécutives, couvrant les municipalités des différentes régions de chaque pays.
- Dans chaque municipalité, sélectionner au hasard trois localités rurales.
- Dans chaque localité, identifier une zone de maïs d'au moins un hectare. Choisissez cinq points d'échantillonnage au hasard et à chaque point, marquez 100 plantes et comptez le nombre de plantes endommagées par la chenille légionnaire d'automne.
- Pour chaque plante, recueillir toutes les larves de chenille légionnaire d'automne et les masses d'œufs, en notant la date et le lieu de collecte.
- Pour trouver les larves, il est souvent nécessaire d'ouvrir les feuilles encore enroulées de la plante, car c'est le lieu de consommation préféré de l'insecte. Lorsque la plante est en phase de reproduction, la larve se nourrit à l'intérieur de l'épi.
- Au laboratoire, placez chaque masse d'œuf individuellement dans un contenant fermé pour empêcher les larves de s'échapper après l'éclosion.
- Utilisez des feuilles de maïs lavées et séchées (à l'ombre) comme source de nourriture pour élever les larves de chenille légionnaire d'automne.
- Changez la nourriture dans le cas des feuilles fanées ou lorsqu'elles sont totalement consommées.
- Si possible, utilisez le milieu artificiel pour élever les larves de chenille légionnaire d'automne.
- Observez quotidiennement la présence de larves nouvellement écloses, compte tenu de la période d'incubation de trois à quatre jours ; à la fin de cette période, s'il n'y a pas d'éclosion des œufs et que ces derniers ont noirci, isoler le reste des œufs et attendre l'émergence éventuelle de parasitoïdes des œufs.
- Gardez les « néonates » (jeunes larves) collectées au laboratoire pendant un minimum de 10 jours pour observer si des parasitoïdes larvaires sont présents.
- Gardez les larves collectées individuellement pour prévenir le cannibalisme.
- Les données devraient inclure la date de collecte, l'emplacement et une estimation du stade larvaire de la chenille légionnaire d'automne à la date de collecte. Avec ces données, il est possible de déterminer la date approximative du parasitisme.
- Suivre le développement des larves au laboratoire jusqu'à la transformation de la chenille légionnaire d'automne en pupes ou jusqu'à l'émergence de parasitoïdes.
- Si l'espèce de parasitoïde ne peut être reconnue, envoyez-la à un spécialiste de l'identification (par exemple, ICIPE en Afrique de l'Est et australe ; IITA en Afrique occidentale et centrale).

4.2 Les prédateurs

Les insectes prédateurs sont des espèces généralistes et dans les zones de maïs ils peuvent se nourrir des œufs et/ou des larves de la chenille légionnaire d'automne ainsi que d'autres espèces de ravageurs. Par conséquent, il sera également important d'échantillonner pour la présence de prédateurs dans les mêmes points des parasitoïdes.

L'échantillonnage des prédateurs peut être effectué de trois façons: a) Ensacher le verticille du plant de maïs avec un sac en plastique ou en filet et enlever immédiatement les feuilles pour poursuivre le comptage et l'identification des autres insectes ; b) effectuer un échantillonnage avec un filet fauchoir ; c) utiliser l'observation visuelle directe.

4.3. Les entomopathogènes

En général, lorsqu'une larve de chenille légionnaire d'automne est infectée par un pathogène, elle change de couleur, augmente en pâleur et diminue en mouvement, surtout lorsqu'elle est touchée. Cependant, la meilleure façon d'identifier une larve infectée est quand elle est déjà morte. En particulier pour les larves de la chenille légionnaire d'automne infectées par le Baculovirus (voir Section 3.2.1), les larves décédées sont généralement observées dans les parties supérieures du plant de maïs et pendantes. Les larves mortes couvertes d'une masse blanche ou verdâtre poudreuse suggèrent une infection fongique. Indépendamment des symptômes, toute larve présentant un comportement anormal doit être amenée au laboratoire et conservée à basse température (réfrigérateur) jusqu'à ce que la cause des symptômes soit déterminée.

5. Procédures d'élevage des ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne au laboratoire

5.1. Production et utilisation d'un parasitoïde des œufs, *Trichogramma*

Embrapa a une technique d'élevage efficace pour *Trichogramma* qui est transférée aux agriculteurs (Cruz *et al.* 2013 ; Almeida et Cruz 2013 ; Almeida *et al.* 2013). L'élevage artificiel de *Trichogramma* a progressé au cours des 20 dernières années grâce à la découverte d'hôtes alternatifs qui permettent le développement du parasitoïde d'une manière semblable à celle de l'hôte préféré. L'utilisation de ces hôtes alternatifs est avantageuse en raison du faible coût de l'élevage, de la facilité des procédures et de la capacité de reproduction élevée. Parmi les insectes les plus utilisés comme hôtes alternatifs, on trouve des ravageurs de stock des grains ou des ravageurs de farine comme *Corcyra cephalonica* (Stainton), *Sitotroga cerealella* Oliver et *Anagasta kuehniella* (Zeller). Cette dernière espèce a été le plus souvent utilisée dans la production des œufs comme hôtes alternatifs de *Trichogramma*, bien que *Corcyra* soit utilisé au Niger et au Sénégal. Connu sous le nom de papillon de farine, *A. kuehniella* est un petit papillon de couleur grise-foncée, avec un cycle de vie d'environ 40 jours. Un gramme d'œufs d'insectes équivaut à 36 000 œufs.

La période larvaire varie selon la température, en moyenne 29 jours à 27,9°C et 73%RH. Le nombre de larves par boîte d'élevage peut aussi affecter la durée de développement de la pyrale. Une augmentation du nombre de larves entraîne une diminution de la taille des adultes, une hausse de la durée du cycle et de mortalité.

Les pupes présentent une période de développement de 8 à 16 jours aux températures d'été, ce qui peut être long si les conditions sont défavorables. À 30°C et 73% RH, la période de pupes est de 8 jours. Les adultes ont un cycle de vie relativement court. À 30°C et à 73% RH, les couples en copulation ont un cycle beaucoup plus court (6 jours pour les femelles et 7 jours pour les mâles) que ceux qui ne s'accouplent pas (11 et 10 jours, respectivement, pour les femelles et les mâles).

La capacité de ponte atteint en moyenne 350 œufs, avec 80 à 90% des œufs produits entre le 3ème et le 4ème jour de ponte. Habituellement, les œufs sont déposés peu après l'accouplement et la ponte se termine généralement deux à cinq jours après l'émergence.

Une température de 27°C est considérée comme la meilleure pour la fertilité. Les femelles peuvent amorcer la ponte 24 à 48 heures après l'émergence. Une photopériode ouverte 24 h/24 peut causer une réduction de la fécondité et la viabilité des œufs des couples où les mâles ont été maintenus dans ces conditions est inférieure à celle des couples où les mâles ont été élevés dans l'obscurité de 24 heures. Le développement de l'œuf à l'adulte, à 28-30°C et à 73% RH, dure environ 41 jours.

5.1.1. Procédure d'élevage pour *Anagasta*

Les larves du papillon gris de la farine sont élevées sur un milieu de maïs ou de blé, seule ou en mélange égal, enrichi de levure de bière (3%), réparties dans des boîtes en plastique de 5l, suivant les procédures ci-dessous.

5.1.1.1. Préparation des boîtes d'élevage

- i. Utilisez des boîtes en plastique (10 cm de haut × 20 cm de largeur × 30 cm) avec des capuchons « Snap-On ».
- ii. Pour fournir la ventilation à l'intérieur de boîte, faites une coupe (de 9 cm de largeur × 19 cm) en haut du couvercle.
- iii. Pour prévenir la pénétration des ennemis naturels, fermez la partie enlevée par un tissu fin (organza), fixé avec du ruban adhésif à l'intérieur et à l'extérieur.

5.1.1.2. Préparation du milieu et installation des boîtes d'élevage des larves

Ni le maïs ni le blé utilisé dans cette procédure ne doivent être traités avec aucun type de pesticide ; il est donc nécessaire d'examiner la provenance des céréales acquises.

- i. Meulez finement les grains.
- ii. En fonction de la granulométrie, tamisez le matériau à l'aide d'un tamis à mailles de 1,5 mm.
- iii. Après le tamisage, stockez la farine de chaque céréale dans un environnement hermétique afin d'éviter les infestations par les insectes ; le stockage dans un congélateur est préférable. Mélangez la farine avec la levure de bière à l'avance, si nécessaire, ou immédiatement avant l'utilisation.
- iv. Placez la nourriture (500 g de son de maïs, 500 g de son de blé, 30 g de levure de bière) uniformément à l'intérieur de la boîte en plastique avec un léger compactage pour niveler milieu.
- v. À la surface du milieu, étalez environ 0,20 g d'œufs d'*Anagasta* (environ 7 200 œufs), puis fermer avec le couvercle et le sceller avec un ruban adhésif pour empêcher l'entrée des parasitoïdes.
- vi. Gardez les boîtes sur les étagères dans une pièce climatisée (25°C) pour permettre une bonne ventilation à l'intérieur.

5.1.1.3. Construction de cage « d'oviposition » ou de ponte

- i. Construisez la cage en utilisant un tuyau en PVC 300 mm de diamètre et 25 cm de haut.
- ii. Construisez la cage en utilisant un tuyau en PVC 300 mm de diamètre et 25 cm de haut.
- iii. Collez le filet sur les anneaux avec de la colle « araldite ».
- iv. Utilisez un plat en plastique (du type utilisé dans les plantes en pot) comme un collecteur d'œufs.

5.1.1.4. Collecte des adultes d'*Anagasta*

- i. Après avoir observé l'émergence des premiers *Anagasta* adultes (environ 40 jours), les recueillir quotidiennement au moyen d'un aspirateur. La période de collecte dure entre 15 à 20 jours. La récolte des papillons adultes est habituellement effectuée le matin, en raison de la mobilité réduite des insectes.
- ii. Collecter les insectes dans environ dix boîtes et les transférer dans un sac en plastique (capacité 20 l). Après avoir collecté les insectes de 40 boîtes par plateau, transférez-les dans la cage de ponte.

5.1.1.5. Obtenir des œufs de papillon gris de farine

- i. Après avoir obtenu le nombre désiré d'adultes (environ 10 000 à 12 000 insectes), attachez les anneaux au tuyau en PVC avec un ruban de crêpe.
- ii. Placez la base de la cage dans le plat en plastique dans lequel les œufs seront collectés.
- iii. Ne donnez aucun type d'aliment. Maintenez les papillons adultes à une température d'environ 25°C et d'une humidité d'au moins 70%. Les adultes restent dans la cage pendant 5 jours en moyenne.

5.1.1.6. Collecte des œufs

- i. Habituellement, commencez la collecte des œufs le lendemain après les avoir rassemblés dans la cage de ponte. Beaucoup d'œufs tomberont directement dans le plat. D'autres seront coller à la paroi de la cage. Par conséquent, passez une brosse sur l'extérieur de la paroi qui couvre les deux anneaux supérieur et inférieur puis taper sur la cage pour terminer l'enlèvement des œufs.
- ii. Passez les œufs à travers un tamis de 0,50 mm pour enlever les résidus tels que les restes de farine ou les écailles d'insectes. Nettoyez les œufs à nouveau à l'aide d'une fine brosse et d'un tampon de coton et passez légèrement du coton sur les œufs.
- iii. Mesurez la productivité quotidienne en pesant les œufs, considérant en moyenne 36 000 œufs par gramme.
- iv. Utilisez la grande majorité des œufs pour produire le parasitoïde et le reste pour maintenir la colonie du papillon gris de farine. Mettez les œufs dans un tube en plastique, sans humidité, pour les empêcher de se coller les uns aux autres.

5.1.1.7. Contrôle de qualité des œufs produits

- i. Avant de rassembler les boîtes de multiplication du papillon gris de farine, évaluez la viabilité des œufs. Pour ce faire, individualisez les œufs, à l'aide d'une brosse, dans les trous d'une plaque en plastique (p. ex. une plaque ELISA à 96 puits) et ensuite scellez la plaque avec un ruban plastique.
- ii. Après six jours, en moyenne, comptez le nombre de larves d'*Anagasta* et déterminez la viabilité des œufs, en considérant comme normale une viabilité supérieure à 75%.

5.1.2. Production du *Trichogramma*

Il existe plusieurs systèmes pour la production du *Trichogramma* avec des œufs d'*Anagasta*, mais ils suivent généralement une technique de base. Au départ, les œufs de papillon sont placés sur des cartes en carton rectangulaires, en conservant un bord sans œuf de 1,5 à 2,0 cm le long de sa longueur la plus courte. Les cartes sont ensuite placées dans des boîtes en plastique ou en verre. Pour le parasitisme, on peut utiliser un ratio entre les œufs parasités et non parasités d'environ 1:15, avec une période d'exposition de 48 heures.

5.1.2.1. Préparation de la carte

- i. Découpez le carton blanc à 10 × 15 cm.
- ii. À l'exception d'un espace de 2 cm à une extrémité, couvrir toute la zone avec de la colle de gomme arabique. D'abord diluez la colle dans l'eau (20% de colle et 80% d'eau), puis l'étaler uniformément sur la carte à l'aide d'une éponge.
- iii. Distribuez immédiatement des œufs sur la colle, en évitant la formation de couches car cela altère le parasitisme. Pour faciliter la distribution, placez les œufs à l'intérieur d'un petit tube recouvert d'un tissu de maillage suffisamment fin pour passer un seul œuf à la fois. De plus, placez la carte à un angle de 45°. Notez la date de distribution des œufs.
- iv. Pour une meilleure conservation, ranger les cartes dans un réfrigérateur (jusqu'à une semaine) et, si possible, dans les boîtes en mousse. Environ 25 000 œufs sont distribués sur chaque carte.

5.1.2.2. Élevage des parasitoïdes

- i. Une fois que les cartes avec les œufs de papillon gris de farine ont séché, introduisez trois à cinq cartes dans une boîte en plastique ou en verre de 1,6 l. À l'intérieur de ces boîtes devrait déjà être une carte complètement parasitée et qui montre l'émergence des premiers adultes.
- ii. Comme nourriture pour le *Trichogramma*, utilisez des gouttes de miel sans résidus de pesticides (huit petites gouttelettes, car les grosses gouttelettes peuvent piéger les guêpes miniatures) dispersées sur une paroi de la boîte.
- iii. Deux jours après la première distribution, des cartes d'œufs supplémentaires pourraient être ajoutées aux boîtes.
- iv. Scellez les boîtes avec une mince couche de PVC et les garder sur des tablettes. Environ trois à quatre jours après le placement de la carte, les œufs parasités deviennent foncés, ce qui permet une évaluation qualitative du taux de parasitisme. À ce moment, retirez les cartes des boîtes et les placer, selon la date de distribution, dans d'autres boîtes identiques sans parasitoïdes adultes. Habituellement, le taux de parasitisme est supérieur à 90%. Si, pour une raison quelconque, le taux de parasitisme est plus faible, éliminez les larves écloses.

5.1.3. Contrôle de la qualité du parasitisme

Pour contrôler la qualité du parasitisme, prélevez trois échantillons de 100 œufs sur une carte et enregistrez le nombre d'œufs parasités, le pourcentage d'émergence des guêpes et le sexe ratio (nombre de femelles divisées par le nombre total d'insectes émergés). Ceci est important tant pour la continuité de la reproduction que pour le lâcher au champ. Comme il y a la possibilité d'avoir plus d'une guêpe dans chaque œuf parasité, comptez le nombre de trous de sortie dans les œufs de l'*Anagasta* pour déterminer la viabilité.

5.1.4. Entretien dans l'élevage

Afin d'éviter toute interruption dans le flux d'insecte aussi bien de l'hôte et que du parasitoïde, maintenez un contrôle strict sur les conditions d'asepsie dans les sites de reproduction. Après que les papillons adultes ont été collectés dans la farine, s'assurer que les boîtes soient débarrassées des cartes dans le congélateur pour éviter la contamination de l'environnement d'élevage.

Pendant l'élevage d'*Anagasta*, il faut prendre soin d'éviter la présence d'un parasitoïde larvaire (*Habrobracon*), qui parvient généralement à un nombre de populations élevées lorsque les boîtes d'élevage ne sont pas bien protégées. Si ces parasitoïdes surviennent dans la colonie, débarrassez immédiatement les boîtes contaminées en plaçant le matériau dans un congélateur pendant au moins 24 heures pour tuer le parasitoïde contaminant.

Lorsque les conditions d'hygiène ne sont pas adéquates et que la collecte des papillons dépasse 20 jours, on peut trouver un acarien prédateur qui prédomine sur les œufs de l'*Anagasta* et, par conséquent, compromet la production de parasitoïdes. La même procédure utilisée pour contrôler *Habrobracon* peut être suivie pour l'acarien.

5.1.5. Le lâcher au champ

5.1.5.1. Facteurs affectant l'efficacité

Les facteurs qui affectent l'efficacité du parasitoïde lâcher artificiellement dans le champ comprennent le nombre d'insectes lâchés, la densité des parasites, l'espèce de *trichogramma*, la saison et le nombre de lâchers, la méthode de distribution, la phénologie de la culture, le nombre d'autres ennemis naturels dans la zone cible et les conditions climatiques.

Nombre d'insectes par hectare: Le nombre d'insectes à lâcher par unité de surface varie en fonction de la densité de population du ravageur. En moyenne, environ 100 000 individus sont lâchés par hectare, ce qui équivaut approximativement au nombre d'insectes sur cinq cartes.

Nombre de lâchers: En fonction de l'affluence du ravageur dans la région, surtout dans les endroits où le déséquilibre biologique est évident, de nouveaux lâchers seront parfois nécessaires.

Méthode de lâchers: Pour lâcher le parasitoïde, il existe plusieurs méthodes, mais la plus recommandée est le lâcher de l'insecte adulte.

- i. Pour lâcher des insectes adultes, utiliser des boîtes en plastique ou en verre de 1,6 à 2 l contenant entre trois et cinq cartes de 150 cm² avec des œufs parasités. Enveloppez les boîtes avec un tissu noir, sécurisé par une bande de caoutchouc.
- ii. Quelques heures après l'émergence des adultes, apportez les boîtes au champ.
- iii. Ouvrez et fermez les boîtes par intermittence dès que le site du lâcher est franchi, en calibrant ainsi le rythme des pas de marche pour couvrir uniformément le champ.
- iv. Le lendemain, ramenez les boîtes au même endroit, pour la distribution du reste du matériel qui sont émergés, en déposant soigneusement les cartes sur les plants à la fin. Effectuez ce deuxième lâcher à partir de la direction opposée à celle utilisée le premier jour (p. ex. premier jour - nord-sud ; deuxième jour – sud-nord).
- v. Lorsque vous utilisez la technique consistant à garder la boîte ouverte tout le temps, gardez la boîte en position horizontale, avec l'ouverture tournée dans la direction opposée à la direction de la marche, permettant ainsi à l'insecte de sauter sur les plants.

Une autre méthode de lâcher consiste à placer la carte elle-même avant l'apparition des adultes. Lorsque l'apparition des premiers adultes est observée, apportez le matériel au champ, en le distribuant à l'intérieur du verticille de la plante.

Points de lâchers: Si les parasitoïdes qui sont encore des pupes à l'intérieur des œufs d'*Anagasta*, c.-à-d. près de l'émergence, sont utilisés, les points de lâcher devraient aller de 25 à 30 par hectare. Dans ce cas, subdivisez les cartes en fonction du nombre de points de lâchers puis les distribuer aux points établis.

Temps de lâcher: La distribution du *Trichogramma* dans le champ doit être synchronisée avec l'apparition des premiers œufs et/ou adultes de l'insecte. Répétez les lâchers à un intervalle de moins d'une semaine, selon le degré d'infestation des œufs de ravageurs. Le bon moment pour commencer les lâchers, la fréquence et la quantité utilisée sont des facteurs fondamentaux pour assurer l'efficacité de la lutte biologique avec le *Trichogramma*. Il est très important de faire des évaluations avant et après les lâchers, de quantifier le comportement du parasitoïde et de mesurer son action réglementaire. De cette manière, on peut aussi apporter les ajustements nécessaires. Si possible, effectuer la distribution des œufs à des points stratégiques pour déterminer le taux de parasitisme. Sinon, faire cette détermination en collectant des œufs des populations naturelles du ravageur. L'efficacité peut aussi être évaluée par les dommages causés aux feuilles ou aux épis de maïs, en utilisant une échelle visuelle de dégâts.

5.1.6. Précautions pendant le lâcher

- Les espèces de *trichogramma* sont positives en phototrophes, c'est-à-dire qu'elles présentent une activité de ponte pendant la journée ; elles peuvent donc être très sensibles aux effets toxiques des insecticides non sélectifs.
- L'efficacité du *Trichogramma* au champ est également affectée par les conditions climatiques. Il a été vérifié, pour certaines espèces, que l'humidité relative n'a aucun effet sur la survie et la capacité de dispersion du parasitoïde dans les intervalles de 33 à 92%. De plus, l'action du vent, des vitesses de moins de 3,6 m/sec, n'a pas d'influence sur la dispersion des femelles. Le taux de dispersion (cm/min) du parasitoïde, chez les deux sexes, augmente à des températures plus élevées. Les mâles semblent plus sensibles aux températures élevées que les femelles, bien que les températures inférieures à 20°C aient réduit la capacité de dispersion.
- Lors des lâchers, il est nécessaire de tenir compte de la direction du vent, l'intensité du rayonnement solaire (chaleur) et la présence de précipitations.
- Pour une plus grande efficacité du parasitoïde, la réduction ou l'élimination de l'utilisation d'insecticides chimiques est nécessaire. Si l'application de pesticides est nécessaire, sélectionnez des produits moins toxiques et continuez à lâcher les parasitoïdes deux ou trois jours plus tard, en augmentant la dose et la fréquence, pour rétablir l'équilibre biologique.

- L'intégration des lâchers avec d'autres méthodes culturales, microbiologiques, physiques et mécaniques peut accroître l'efficacité globale de la lutte.

5.2. Production du parasitoïde des œufs *Telenomus remus*

Pour la production artisanale, *T. remus* est élevé sur les œufs de chenille légionnaire d'automne, comme décrit dans la méthode ci-dessous. Il est également possible d'élever ce parasitoïde sur *Corcyra céphalonica*. Au départ, les masses d'œufs d'hôte sont collées sur des cartes rectangulaires, placées dans des boîtes en plastique ou en verre pour permettre le parasitisme. Pour la multiplication des parasitoïdes, on peut utiliser un ratio œufs parasités-œufs non parasités d'environ 1:5, avec une période d'exposition de 48 heures.

5.2.1. Préparation de cartes

- i. Découper des cartons blanches ou noirs à la taille 10 × 15 cm.
- ii. À l'exception d'un espace de 2 cm à une extrémité, recouvrir toute la zone avec la colle de « gomme arabique », qui devrait être diluée au départ avec de l'eau (20 % de colle, 80 % d'eau) et répartir uniformément sur le carton à l'aide d'une éponge.
- iii. Distribuez immédiatement les masses d'œufs de l'hôte sur la colle, à l'aide des pinces à épiler. Distribuer environ 60 masses d'œufs (environ 18 000 œufs) sur chaque carte.
- iv. Enregistrez la date de distribution des œufs afin de mieux calibrer la date d'émergence prévue pour adultes.
- v. Stockez les cartes dans un réfrigérateur (jusqu'à une semaine) et, si possible, dans les boîtes en polystyrène. L'âge de l'hôte peut influencer la performance du parasitoïde. Les expériences effectuées avec différents âges d'œuf lorsque le parasitoïde a le choix, montrent qu'il préfère pondre dans les masses d'œufs d'au plus 36 heures de développement embryonnaire, bien qu'il puisse, dans une moindre mesure, parasiter les œufs jusqu'à 60 heures d'âge, dans un essai de non-choix.

5.2.2. Infestation des œufs

1. Une fois que les cartes avec les œufs de chenille légionnaire d'automne sont séchées (température ambiante), introduisez six cartes (environ 100 000 œufs) dans une boîte en plastique ou en verre de 1,6 l contenant déjà une carte entièrement parasitée et à une journée ou moins de l'émergence des adultes.
2. Comme nourriture pour les adultes parasitoïdes, les gouttes de miel éparpillées (huit petites gouttelettes, comme les grosses gouttelettes peuvent piéger les petites guêpes) sur une paroi de la boîte.
3. Scellez les boîtes avec une mince couche en plastique et les gardez sur des étagères. Environ trois à quatre jours après le placement de la carte, l'œuf parasité devient sombre, permettant une façon qualitative d'évaluer le taux de parasitisme. Lorsque cela survient, retirez les cartes des boîtes et les placer, selon la date de distribution, dans d'autres boîtes identiques sans parasitoïdes adultes.

Habituellement, le taux de parasitisme est supérieur à 90%. Si, pour une raison quelconque, le taux de parasitisme est inférieur et que les larves éclosent dans l'hôte, retirez-les à l'aide d'une brosse ou transférez la carte parasitée dans une autre boîte.

La température et l'humidité relative peuvent aussi influencer la performance du parasitoïde, surtout lorsqu'elle est inférieure à 70%.

5.3. Production de *Chelonus spp.*

L'établissement d'une petite colonie de *Chelonus* peut être initié avec des œufs parasités ou des larves de chenille légionnaire d'automne ou des adultes parasitoïdes collectés sur le terrain.

- i. Au laboratoire, gardez les insectes collectés dans des pièces à faible variation de température (l'optimum étant $25\pm 2^\circ\text{C}$). Peu après l'émergence, placez les adultes dans les cages de ponte. Maintenez les larves de chenille légionnaire d'automne parasitées individuellement sur le milieu artificiel ou naturel jusqu'à l'émergence des adultes. Si vous utilisez un milieu artificiel, n'utilisez pas les anti-contaminants.
- ii. Placez cinq couples de *C. insularis* dans une cage de ponte (boîte transparente comme le verre en un pot en plastique, par exemple, avec une capacité de 1,6 l) contenant une source de nourriture composée de 10% de solution de sucre, enrichie avec 0,1% de l'acide ascorbique. Cette solution peut être préalablement préparée (conservée dans le réfrigérateur) et offerte au moyen d'un rouleau denté de coton introduit dans des coupelles en plastique (50 ml) et fixé dans un trou fait au milieu d'un couvercle en polystyrène ou d'un autre type de couvercle.
- iii. Fermez la cage de ponte avec un bon filet fabriqué pour aération. Gardez les insectes au laboratoire avec une température moyenne de $25\pm 2^\circ\text{C}$, une humidité relative de $70\pm 10\%$ et une photopériode de 12 heures pour permettre l'accouplement.
- iv. Après la période d'accouplement, remplacez la source d'aliments trois fois par semaine. Offrez aussi quotidiennement, pendant une semaine, environ trois masses d'œufs de chenille légionnaire d'automne de moins de 24 heures de développement embryonnaire. En cas de décès du parasitoïde femelle, en ajouter un autre dans la boîte si disponible. Après chaque période de parasitisme, enlevez les masses d'œuf de chenille légionnaire d'automne parasitées et individualisez-les dans des coupelles en plastique contenant du milieu artificiel, en notant la date du parasitisme.
- v. Placez les coupelles dans des styromousses et les garder sur des étagères dans les mêmes conditions environnementales que les adultes *C. insularis*. Sept jours après l'éclosion, individualisez les larves parasitées pour éviter le cannibalisme, en les conservant dans une boîte d'élevage jusqu'à l'apparition des adultes parasitoïdes, habituellement 30 jours après le parasitisme. La pupaison du parasitoïde se fait dans le milieu. Au moment de l'émergence des adultes, enregistrez le sexe de chaque individu et lancez une nouvelle génération. La différenciation sexuelle des *C. insularis* peut être effectuée à travers les antennes, qui sont nettement plus long chez les mâles.

Apparemment, il n'y a pas de période de pré-ponte chez *C. insularis* ; la période moyenne d'incubation est de 1,8 jours. La période larvaire varie de 17 à 23 jours, avec une moyenne de 20,4 jours ; la période moyenne de pupaison est de 6,2 jours. La durée moyenne du cycle total est de 28,6 jours. La longévité moyenne des femelles accouplées est, en moyenne, de 11,6 jours, avec un maximum de 18 jours et un minimum de 5 jours. Le nombre d'œufs parasités et la longévité varient considérablement d'une femelle à une autre, et la capacité de parasiter est considérablement réduite à l'approche de la mort. Le taux le plus élevé de parasitisme survient lorsque les femelles ont trois jours d'âge, avec un maximum de 92,2 et un minimum de 48,1 œufs parasités ce jour-là. Dans l'intervalle entre le 3ème et le 6ème jour, les femelles ont un taux de parasitisme de 72% à 80%.

Bien que la consommation alimentaire d'une larve parasitée soit beaucoup plus faible que celle d'une larve normale, il n'est pas possible de réduire la quantité de nourriture parce que l'alimentation sèche, entraînera une forte mortalité.

5.4. Production de *Campoletis flavicincta*

Les mêmes procédures d'élevage pour le *Chelonus* sont utilisées pour élever le *C. flavicincta*, mais avec cette espèce le milieu artificiel est complet ; c'est-à-dire qu'il est préparé avec des anti-contaminants.

- i. Après la séparation par sexe, qui est facilitée par l'ovipositeur femelle exposé, placez cinq couples de *C. flavicincta* dans une cage de ponte dans des salles acclimatées à $25\pm 2^\circ\text{C}$, une humidité relative de $70\pm 10\%$ et une photopériode de 12 heures, pendant une période de cinq jours pour l'accouplement.
- ii. Après la période d'accouplement, remplacez la source alimentaire pour l'adulte trois fois par semaine. Chaque jour pendant une semaine, offrez environ 150 larves de la chenille légionnaire d'automne de trois jours au parasitoïde. Après chaque période de parasitisme de 24 heures, individualisez les larves parasitées dans les boîtes en plastique contenant le milieu. Gardez les insectes sur les étagères dans les mêmes conditions environnementales que les couples *C. flavicincta*.

- iii. Les premières pupes du parasitoïde apparaissent généralement huit jours après l'individualisation des larves. Trois jours après l'apparition de ces premières pupes, éliminez les larves non parasitées et calculez le nombre d'insectes parasités. Sept jours après cette période, l'émergence des adultes commence. Contrairement au *Chelonus*, dont la pupa se trouve dans le milieu, la pupa de *Campoletis* se produit généralement dans les parties supérieures de la boîte de reproduction. Le cycle total du parasitoïde est, en moyenne, de 22,9 jours: 14,5 jours entre l'œuf et la pupa et de 7,3 jours pour l'achèvement de la période de pupa. Les larves parasitées vivent environ une semaine moins que les chenilles saines.
- iv. Comme la consommation alimentaire d'une larve parasitée ne représente que 16,9% de la consommation d'une larve normale, il est possible d'utiliser seulement un tiers de la quantité de nourriture utilisée par une larve sans parasitisme.

6. Actions complémentaires à la lutte biologique

6.1. La lutte biologique classique mise en œuvre par l'intervention du gouvernement

La chenille légionnaire d'automne a fait l'objet de recherches pendant de nombreuses années dans les Amériques. En particulier au Brésil, il existe de nombreux agents de lutte biologique naturelle contre le ravageur au stade des œufs et des larves. En plus de leur efficacité démontrée dans les conditions de terrain, des technologies d'élevage en laboratoire existent déjà. Compte tenu de la similarité relative en termes de sols et de conditions climatiques, l'introduction prudente de ces agents de lutte biologique est très prometteuse pour maintenir le ravageur à des niveaux de population acceptables et, surtout, éviter l'application de produits chimiques, en particulier dans les petits producteurs agricoles. En outre, au regard des capacités institutionnelles de nombreux pays africains, l'incitation gouvernementale est très importante pour l'atténuation des ravageurs aujourd'hui et dans le futur. En plus d'être une solution durable contre les ravageurs, elle offre certainement l'occasion d'échanger des expériences et des connaissances continues entre les pays avec autant de partenariats déjà existants dans d'autres domaines d'intérêt commun.

Bien qu'il y ait beaucoup de connaissances au sujet de la chenille légionnaire d'automne, surtout dans les Amériques, il est important que les chercheurs effectuent des enquêtes locales sur des ennemis naturels et produisent ensuite des preuves nécessaires sur l'efficacité, la sélection, la production de masse et le lâcher des ennemis naturels les plus efficaces. Lorsqu'il y a des insuffisances, l'accent devrait être mis sur la lutte biologique classique des espèces ayant une efficacité éprouvée par rapport à la chenille légionnaire d'automne, y compris *Telenomus remus*, *Trichogramma pretiosum*, *Chelonus insularis* et les *Cotesia marginiventris*, en suivant les directives appropriées, y compris une évaluation environnementale appropriée de ces introductions.

Pour obtenir un impact considérable, les gouvernements devraient être prêts à investir dans l'élevage massif et les lâchers à grande échelle, et les producteurs devraient être impliqués dans tous les processus. En fait, la participation des producteurs est nécessaire. En guise d'incitation initiale, les gouvernements pourraient fournir des ennemis naturels efficaces de la chenille légionnaire d'automne aux producteurs pour faire leur propre lâcher et apprécier l'effet de la technologie sur les ravageurs.

6.2. Utilisation des pièges à phéromone femelle pour le suivi et la prise de décisions

L'efficacité de la lutte biologique sur la chenille légionnaire d'automne est directement liée à la synchronisation de la présence de l'insecte avec la présence de l'insecte bénéfique.

Lorsque les pièges sont placés au moment des semis (voir le Chapitre 2), les captures de papillons indiquent que le ravageur a atteint la zone de l'agriculteur et que, bientôt, la femelle commencera à pondre. C'est-à-dire que le piège indiquera au producteur que le ravageur est présent, mais qu'il n'a pas encore causé des dégâts parce qu'il n'y a pas encore de larves. La présence d'œufs est l'indicateur pour utiliser, par exemple, le parasitoïde *Trichogramma* ou *Telenomus*. La capture continue de papillons dans le piège suggère que le producteur devrait continuer à observer les plantes pour la présence de larves. Les larves atteignant 12 mm (habituellement 10 jours après la première capture de papillons dans les pièges) peuvent être contrôlées efficacement soit par des insectes bénéfiques, soit par des bio-pesticides tels que *Metarhizium*, *Beauveria*, *Baculovirus*, *Bacillus thuringiensis*, des champignons ou des extraits végétaux comme les produits du margousier, après évaluation locale contre le ravageur. Autrement dit, le producteur ne devrait utiliser que des bio-pesticides compatibles avec la lutte biologique naturelle. Toutefois, le succès ne sera atteint que lorsqu'il pulvérisera les produits directement dans les verticilles de maïs.

6.3. Sensibilisation des producteurs aux bienfaits de la lutte biologique

L'une des grandes difficultés à établir une culture de lutte biologique dans les zones rurales est le manque de connaissances sur la façon de reconnaître et de séparer les ravageurs des insectes bénéfiques. Il est nécessaire de former ces producteurs en leur montrant que les insectes bénéfiques sont ceux qui se nourrissent des ravageurs qui attaquent les cultures et de ce fait, sont nécessaires à la production agricole comme des insectes pollinisateurs tels que les abeilles.

Des brochures (avec de bonnes photographies), des vidéos et des cours de formation (avec suffisamment de temps pour les visites des champs) seront utiles pour sensibiliser le producteur et sa famille à l'importance de la biodiversité des insectes bénéfiques.

L'utilisation des photos fournies dans ce guide de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne et leur mise à jour progressive avec de nouvelles photos d'agents de contrôle biologique trouvés localement en Afrique contre la chenille légionnaire d'automne constitueront une ressource importante pour la formation continue des producteurs. Cela devrait être jumelé à une base de données gratuite d'ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne identifiés sur le continent africain.

6.4. Suggestions pour la formation continue des agents de vulgarisation rurale et des producteurs

- Former les producteurs et les agents de vulgarisation à l'identification/la collecte des masses d'œufs qui deviennent sombres (les masses d'œufs deviennent sombres trois jours après le parasitisme) et les envoyer au personnel du ministère pour identification, en se souvenant que les parasitoïdes locaux pourraient être meilleurs que les espèces étrangères.
- Fournissez du matériel aux producteurs pour collecter les œufs parasités.
- Rappelez aux producteurs et au personnel de vulgarisation que la chenille légionnaire d'automne pond des œufs en masse, jamais isolés, et que chaque masse d'œufs peut contenir jusqu'à 300 œufs, habituellement couverts d'écailles.
- Les producteurs doivent savoir qu'en évitant l'utilisation de produits chimiques sur leur propriété, ils contribueront à maintenir les agents de lutte biologique naturelles. Mais il est important d'utiliser des stratégies qui favorisent l'augmentation de ces insectes bénéfiques non seulement sur la propriété de chaque producteur, mais aussi dans toute la communauté.
- Encourager les producteurs à gérer les habitats et à utiliser l'agriculture de conservation pour augmenter les parasitoïdes et les prédateurs naturels (voir Chapitre 6).

7. Établissement des petites usines biologiques pour l'utilisation régionale des agents de lutte biologique contre la chenille légionnaire d'automne

7.1. Production à petite échelle des baculovirus infectant la chenille légionnaire d'automne

Depuis 1984, le Brésil recherche des entomopathogènes pour le contrôle de la chenille légionnaire d'automne, en particulier des Baculovirus (voir Section 3.2.1). Ici, une méthode simple est fournie pour produire les Baculovirus dans une usine biologique de taille petite ou moyenne qui peut être appliquée dans les pays africains où l'insecte est déjà établi, comme décrit dans plusieurs publications de Embrapa (Valicente & Tuelher 2009 ; Valicente *et al.* 2010).

7.1.1. Obtention des larves infectées par le baculovirus

Les larves infectées par le baculovirus peuvent être obtenues au champ (Figure 1) à partir de plants de maïs ou achetées auprès d'autres sources, comme dans les laboratoires où le Baculovirus est déjà cultivé.



Figure 1. Larve de la chenille légionnaire d'automne tuée par le Baculovirus sur le plant de maïs (à gauche) ; les larves de chenille légionnaire d'automne mortes montrant une rupture du tégument (à droite).

7.1.2 Formulation de la poudre mouillable du baculovirus

La formulation du Baculovirus en poudre mouillable est effectuée en trois étapes: sélection et collecte des larves, macération et séchage.

7.1.2.1. Sélection et collecte des larves

- i. Utilisez des pinces à épiler pour collecter les larves tuées suites à une infection du Baculovirus, sélectionnées par couleur et apparence externe, et stockez-les dans des boîtes propres.
- ii. Si le temps le permet, les larves mortes peuvent être traitées et formulées immédiatement. Habituellement, une larve tuée par le Baculovirus a un tégument brisé, ce qui rend difficile la collecte de l'insecte (Figure 1). Pour cette raison, les larves mortes peuvent être placées dans le congélateur avant d'être collectées.

7.1.2.2. Macération des larves et incorporation de l'argile de kaolin

- i. Macérez les larves mortes en utilisant un mixeur standard ou industriel, avec une petite quantité d'eau, juste assez pour tourner les lames du mixeur. Les larves doivent être broyées dans le mixeur pendant environ 10 minutes sans interruption.
- ii. Pendant le mélange, ajoutez un agent inerte (argile de kaolin), qui sert de garniture et aide à sécher le produit en formulation de poudre mouillable. L'argile de Kaolin est inerte (ne réagit pas à d'autres éléments) à un pH et à des températures très variables et il existe souvent dans la nature en tant qu'élément libre.

Le producteur peut utiliser le macérât de Baculovirus à condition que le matériau du mixeur soit filtré convenablement pour éliminer toute impureté pouvant boucher ou bloquer la buse lors du traitement au champ.

7.1.2.3. Séchage du baculovirus formulé en poudre mouillable

1. Placez le mélange de larves/inertes dans des plateaux (Figure 2) lavés et nettoyés avec de l'alcool à 70%.
2. Séchez le matériel en laboratoire avec un jet d'air forcé. Après trois à quatre jours, tous les matériaux seront secs (Figure 2).
3. Écrasez la matière sèche à l'aide d'un broyeur (Figure 3).
4. Emballez le matériau dans des sacs en plastique transparents (Figure 3) ou des sacs de papier laminé à l'aluminium (emballage de café).



Figure 2. Formulation de poudre mouillable de baculovirus. Distribution dans le plateau (à gauche) ; Mélange de Baculovirus et de kaolin, complètement sec (à droite).



Figure 3. Fraisage et emballage. Fraisage de la formulation mouillable de Baculovirus (à gauche) ; Baculovirus emballé pour l'application sur un hectare de maïs (à droite).

7.1.2.4. Stabilité du baculovirus de la chenille légionnaire d'automne formulé en poudre humide

Les conditions de stockage peuvent affecter l'infectiosité du Baculovirus. Ainsi, la durée de conservation d'un produit biologique doit être déterminée de manière à pouvoir être utilisée en toute sécurité, en obtenant l'efficacité de contrôle désirée. L'efficacité du Baculovirus a été vérifiée avec l'utilisation de deux matériaux inertes différents: le kaolin et la zéolite. Après un an de stockage, il n'y a pas eu de diminution de l'efficacité de contrôle des larves de la chenille légionnaire d'automne et aucune différence significative entre les temps d'évaluation ou les matériaux inertes utilisés dans la formulation.



CHAPITRE 06

Pratiques agronomiques peu coûteuses et méthodes de gestion paysagère pour la lutte de la chenille légionnaire d'automne

Auteurs: Christian Thierfelder, CIMMYT-Zimbabwe ; Sailou Niassy, ICIPE, Kenya ; Charles Midega, ICIPE, Kenya ; Subramanian Sevgan, ICIPE, Kenya ; Johnnie van den Berg, Université du Northwest, Afrique du Sud ; B.M. Prasanna, CIMMYT- Kenya ; Frédéric Baudron, CIMMYT-Éthiopie ; et Rhett Harrison, ICRAF, Zambie.

1. Introduction

Outre la résistance variétale, la lutte biologique et l'application judicieuse des pesticides chimiques, un certain nombre de pratiques culturales peu coûteuses et d'options de gestion du paysage peuvent être mises en œuvre dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée contre la chenille légionnaire d'automne. Ces approches peuvent être particulièrement convenables pour les petits producteurs agricoles qui manquent de ressources financières pour acheter des semences, des pesticides ou autres intrants agricoles relativement coûteux (Wyckhuys et O'Neil 2010 ; Stevenson *et al.* 2012).

Bien qu'il existe une vaste expérience sur les méthodes culturales et de gestion du paysage pour lutter contre d'autres ravageurs en Afrique (Martin *et al.* 2016 ; Pumariño *et al.* 2015 ; Stevenson *et al.* 2012), il y a encore beaucoup d'incertitudes relatives à l'efficacité de telles approches contre la chenille légionnaire d'automne, et ces insuffisances nécessitent des recherches supplémentaires. Bon nombre de mesures recommandées dans ce chapitre représentent donc **de façon générale** les meilleures pratiques agro-écologiques en matière de lutte contre les ravageurs – bien que ne soient indiquées, certaines preuves récentes suggérant l'efficacité de ces pratiques dans la gestion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique, en particulier la technologie de « Push-Pull » en cultures intercalaires.

Ce chapitre se concentrera sur les méthodes culturales et de gestion du paysage adaptées aux systèmes agricoles à base de maïs communs dans la plupart des régions d'Afrique subsaharienne, avec une référence supplémentaire aux interventions agroforestières.

1.1. Principes de lutte agro-écologique

Les approches agro-écologiques appliquent les connaissances sur les interactions complexes entre les organismes et leur environnement pour suggérer des options de gestion qui réduisent la fréquence et l'intensité de l'infestation des ravageurs et réduisent au minimum les dommages causés par ces derniers sur les cultures. Dans le contexte de la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique, de telles approches se concentrent généralement sur les méthodes culturales des producteurs ou sur les options de gestion du paysage qui permettent d'atteindre les objectifs suivants:

Améliorer la santé des plantes pour mieux résister aux ravageurs. L'amélioration de la santé des plantes, à travers par exemple une amélioration de la gestion des sols et de la nutrition des cultures, peut permettre que les plantes se développent bien avant que les dégâts causés par les ravageurs n'affectent significativement les composantes qui déterminent le rendement (*par ex.* la surface foliaire). Les plantes saines peuvent aussi investir davantage dans leur mécanisme de défense (Chapin, 1991), ce qui augmente la probabilité d'éviter des dégâts importants.

Optimiser le temps de semis et de rotation des cultures pour échapper à la pression des ravageurs. Décaler la période de développement des plantes hôtes par rapport à la présence des ravageurs (*ex.* semis précoce, rotations des cultures). De telles approches fonctionnent en créant une asynchronie entre les stades critiques de croissance des cultures et les ravageurs.

Créer des écosystèmes locaux durables qui sont inhospitaliers au ravageur et attractifs pour ses prédateurs et parasitoïdes.

Les cultures intercalaires ou la rotation des cultures avec des cultures qui ne sont pas préférées par le ravageur peuvent aider à repousser la chenille légionnaire d'automne. Certaines cultures intercalaires, notamment celles produisant des insecticides naturels (*ex.*, *Tephrosia*) ou sécrétant des substances sémio-chimiques répulsives (*p. ex.* *Desmodium*), repoussent les papillons femelles, réduisant ainsi le nombre d'œufs pondus sur les plantes hôtes. Inversement, la création d'écosystèmes durables (*par exemple* par la rétention de résidus de cultures à la surface du sol) qui attirent et préservent les ennemis naturels de la chenille légionnaire d'automne, y compris les prédateurs généralistes (*par ex.* les araignées, les fourmis



Figure 1. Divers paysages offrant un abri et des perchoirs aux oiseaux prédateurs, aux parasites et aux prédateurs susceptibles d'atténuer les dommages causés par la chenille légionnaire d'automne (Source: Frédéric Baudron, CIMMYT).

ou les oiseaux) et les parasitoïdes, peut contribuer à améliorer la prédation et le parasitisme au niveau des populations de la chenille légionnaire d'automne. En particulier, l'accroissement de la diversité de l'habitat à l'échelle du paysage (par exemple, à travers la préservation ou la mise en place de parcelles de végétation naturelle, d'arbres d'ombrage ou de haies) peut accroître l'abondance des oiseaux insectivores et des chauves-souris. L'effet de ces prédateurs voraces et très mobiles dépend de la disponibilité d'un habitat convenable à l'intérieur du champ (par ex., des perchoirs ou des juchoirs appropriés) au travers du paysage plus large (Figure 1).

Les avantages des méthodes culturales et de gestion paysagère découlent souvent de l'interaction entre les facteurs écologiques à travers toute une gamme d'échelles spatiales – de la parcelle au champ et au paysage – qui perturbent et luttent contre le ravageur à plusieurs niveaux tout au long de son cycle de vie (Veres *et al.* 2013 ; Martin *et al.* 2016) (Figure 2). Par exemple, les pratiques culturales telles que les cultures intercalaires, les cultures d'accompagnement, l'agriculture de conservation et l'agroforesterie peuvent simultanément améliorer la santé des plantes, fournir un abri et des sources alimentaires alternatives aux ennemis naturels et réduire la capacité des larves de la chenille légionnaire d'automne à se déplacer entre les plantes hôtes.

Les options de lutte culturelle et de gestion écologique sont très compatibles avec l'utilisation de la résistance variétale et les approches de lutte biologique. En effet, des expériences en laboratoire ont montré que l'évolution de la résistance des insectes face aux mesures de lutte peut être retardée ou empêchée en présence d'ennemis naturels (Liu *et al.* 2014). Toutefois, la pulvérisation aveugle de pesticides toxiques affecte souvent ces ennemis naturels, réduisant ainsi les bienfaits de la lutte biologique (Meagher *et al.* 2016) tout en augmentant potentiellement la population de ravageurs secondaires (Tscharntke *et al.* 2016).

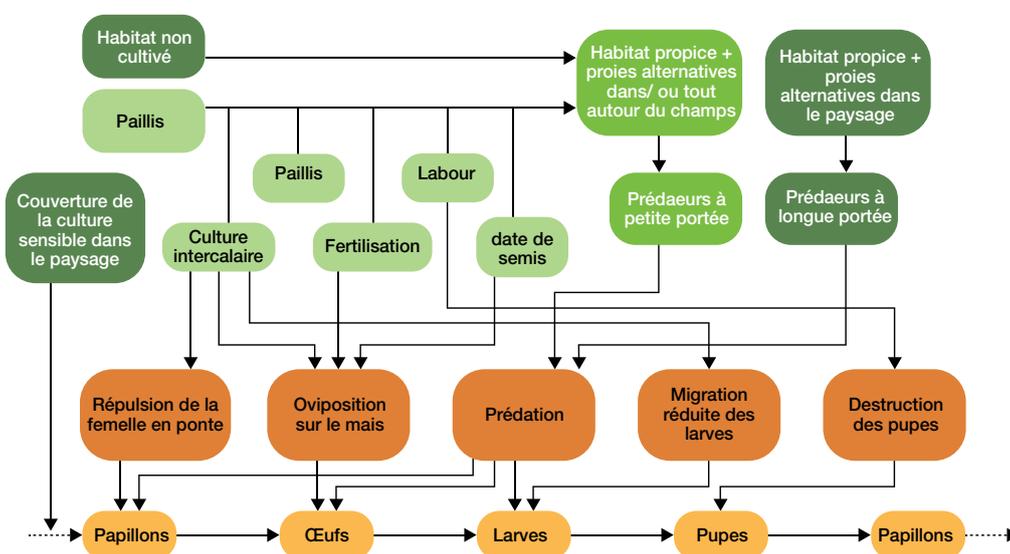


Figure 2. Les méthodes culturales et de gestion du paysage mises en œuvre à diverses échelles spatiales interagissent pour aider à lutter contre la chenille légionnaire d'automne tout au long du cycle de vie du ravageur (Source: Frédéric Baudron, CIMMYT).

1.2. Méthodes culturales et gestion du paysage dans le contexte des petits producteurs agricoles africains

Bien que les concepts agro-écologiques sous-tendent largement toute approche de lutte intégrée, ils peuvent être particulièrement convenables dans la conception et la mise en œuvre de méthodes de gestion peu coûteuses en particulier pour les petits producteurs agricoles. Car, ces derniers peuvent ne pas avoir accès au capital financier pour acheter des pesticides, des semences améliorées ou d'autres intrants relativement coûteux, sur lesquels la lutte chimique ou la résistance variétale, composantes d'une approche de lutte intégrée, sont généralement basés. Comme la plupart des méthodes culturales et de gestion paysagère reposent sur la main-d'œuvre plutôt que sur le capital financier, elles peuvent être plus accessibles aux petits producteurs agricoles.

À l'échelle de la parcelle, du champ et du paysage, les interventions culturales sont généralement mises en œuvre par les petits producteurs agricoles, idéalement avec les conseils des vulgarisateurs, des partenaires en développement ou d'autres experts compétents. Bien que les agriculteurs et les praticiens individuels puissent également mettre en œuvre des interventions au niveau du paysage, les approches à l'échelle du paysage exigent généralement la participation des collectivités, des gouvernements ou d'autres organisations afin de coordonner l'action sur une échelle suffisante pour atteindre l'impact souhaité sur la population du ravageur.

2. Option de lutte culturales et de gestion paysagère

2.1. Pratiques recommandées pour lutter contre la chenille légionnaire d'automne

Sur la base d'un examen des données disponibles, les méthodes de lutte culturales peu coûteuses et les options de gestion du paysage suivant sont actuellement recommandées pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne. À l'exception de l'approche « Push-Pull », pour laquelle des preuves expérimentales existent, et qui suggèrent son efficacité dans la gestion de la chenille légionnaire d'automne dans le contexte africain (Section 2.1.1), bon nombre des mesures ci-dessous proposées représentent les meilleures pratiques génériques de gestion des cultures et du paysage pour la lutte contre les ravageurs, et n'ont pas été spécifiquement validées pour la gestion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique (Section 2.1.2). Il convient également de noter que, si ces approches sont privilégiées en raison de leurs faibles coûts financiers, dans de nombreux cas, elles peuvent nécessiter un investissement substantiel de main-d'œuvre pour leur mise en œuvre et ne sont donc pas totalement sans coût.

2.1.1. Le système « Push-Pull » ou les cultures d'accompagnement

Dans le cadre de la stratégie « Push-Pull » ou cultures d'accompagnement, les agriculteurs protègent les cultures céréalières contre les dégâts causés par les ravageurs en les intercalant avec des espèces végétales répulsives (« push ») (par exemple, *Desmodium* spp.), entouré d'une espèce de plante piège attractive au ravageur (« pull ») [habituellement des herbes telles que le napier *Pennisetum purpureum* Schumach.) ou *Brachiaria* spp.] (Tableau 1). Dans une étude récente menée dans toute l'Afrique de l'Est, les producteurs qui ont complètement mis en œuvre l'approche « Push-Pull » ont réduit les infestations de la chenille légionnaire d'automne et les dommages aux cultures de 86%, avec une augmentation de rendement de 2,7 fois plus par rapport aux champs voisins qui n'ont pas mis en œuvre cette approche (Midega *et al.* 2018) Figure 3.

Quoique la mise en œuvre de l'approche « Push-Pull » nécessite au départ des coûts financiers pour l'établissement des cultures d'accompagnement, les coûts baissent graduellement au cours des saisons suivantes. En outre, au-delà de la lutte contre la chenille légionnaire d'automne et d'autres ravageurs foreurs de tiges du maïs, il a été reporté aussi que l'approche « Push-Pull » réduit les infestations du *Striga*, augmente la teneur en azote et l'humidité du sol et surtout offre un environnement propice pour la prolifération des prédateurs et des parasitoïdes de la chenille légionnaire d'automne (Khan *et al.* 2010). Toutefois, les avantages de l'approche « Push-Pull » dépendent énormément d'une gestion et d'une mise en place adéquates des cultures d'accompagnement, et requiert par conséquent une main-d'œuvre hautement qualifiée et intensive.

Des matériels de vulgarisation, notamment des vidéos, des scénari radiophoniques, des brochures et des matériels de formation pour les producteurs, ont été développés en plusieurs langues pour faciliter la diffusion de l'approche « Push-Pull », et sont disponibles sur le site web: www.push-pull.net.

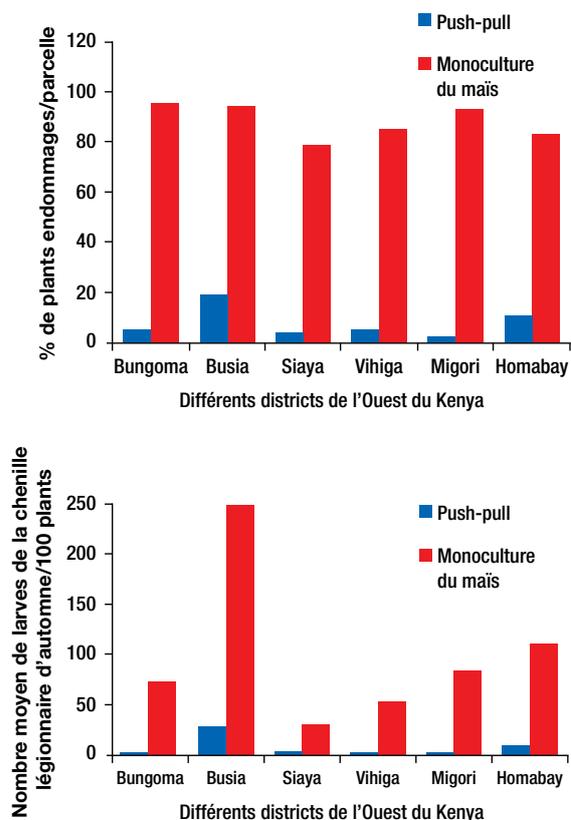


Figure 3. Effet de la technologie « Push-Pull » sur la chenille légionnaire d'automne. (Source: Midega *et al.* 2018)

2.1.2. Les meilleures pratiques générales en matière de lutte culturale et de gestion du paysage

En plus de la stratégie « Push-Pull » ou de cultures d'accompagnement susmentionnées, nombre d'autres méthodes culturales et de gestion paysagère ont démontré un certain degré de succès dans la gestion des populations des ravageurs dans divers systèmes agricoles. Des recherches en cours et futures seront nécessaires pour déterminer l'efficacité spécifique de ces approches contre la chenille légionnaire d'automne dans le contexte africain, et fournir ainsi des indications plus claires sur l'avantage comparatif pour les petits producteurs agricoles d'investir des fonds et/ou de la main-d'œuvre pour mettre en œuvre ces approches. Toutefois, les preuves actuelles sont suffisantes pour les recommander globalement comme meilleures pratiques (Tableau 1).

Dans certains cas, ces approches peuvent être entreprises directement par des petits producteurs, idéalement avec des conseils techniques des vulgarisateurs, des commerçants de produits agricoles ou d'autres experts. Dans d'autres cas – en particulier pour les interventions à l'échelle du paysage – les approches suggérées ici nécessitent une action coordonnée au niveau des villages ou des communautés, ou même au niveau des décideurs politiques, afin d'atteindre une échelle suffisante pour avoir un impact suffisant sur les populations de ravageurs.

Tableau 1. Options de lutte culturale et de gestion paysagère recommandées pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique.

Méthode	Description	Efficacité	Coût financier	Acteurs pertinents	Preuves scientifiques et renseignements complémentaires
Planter au moment recommandé/optimal	Ne pas retarder la plantation. Profiter pour planter dès les premières pluies, puisque les populations des chenilles légionnaires d'automne n'apparaissent que plus tard durant la saison des cultures.	Des données provenant des recherches menées sur d'autres foreurs de tiges de maïs montrent que les semis précoces ou à temps ont plus de chances d'échapper à l'infestation par les insectes, comparativement aux semis tardifs	Faible	Agents de vulgarisation, agriculteurs	Gebre-Amlak <i>et al.</i> (1989) ; Van den Berg and Van Rensburg (1991)
Nutrition des plantes	Approvisionnement adéquat en nutriments par l'engrais minéral, utilisation des arbres et de légumineuses fixatrices d'azote, de fumiers organiques ou le composte favorisant la croissance saine des plantes.	Une bonne fertilisation réduit les dégâts en augmentant la santé des plantes et leur mécanisme de défenses contre les ravageurs, mais les dégâts peuvent augmenter avec une application excessive d'azote.	Moyen: si l'achat d'intrants supplémentaires est nécessaire	Agents de vulgarisation, agriculteurs, négociants agricoles	Altieri et Nicholls (2003) ; Morales <i>et al.</i> (2001) ; Rossi <i>et al.</i> (1987)
Cultures mixtes avec des cultures d'accompagnement ou des arbres fertilitaires compatibles	Planter d'autres cultures en bandes, en rangées ou en stations entre la culture principale (<i>par ex.</i> pois d'angole, manioc, patates douces, niébé, haricot, citrouilles ou arbres fertilitaires [<i>par ex.</i> , Tephrosia, Gliricidia ou Faidherbia albida]) (Figure 4).	Probablement plus efficace lorsque des plantes non hôtes sont utilisées (par exemple, manioc ou arbres fertilitaires) ou lorsque la diversité des cultures peut interrompre la ponte, et peut augmenter la diversité des organismes utiles, y compris les ennemis naturels du ravageur. Par exemple, le Tephrosia est une source d'insecticides naturels et peut réduire la ponte.	Faible: souvent une pratique traditionnelle.	Agents de vulgarisation, agriculteurs, pépiniéristes	Pichersky et Gershenzon (2002) ; Landis <i>et al.</i> (2000) ; Coolman et Hoyt (1993)
Agriculture de conservation (AC)	L'utilisation combinée du labour zéro, de la rétention de résidus et de la rotation augmente et diversifie l'activité biologique au niveau macro - (araignée, coléoptère, fourmis), méso- (champignons) et microfaune (bactéries). Ces pratiques contribuent également à améliorer la santé des sols, ce qui contribue à une croissance plus vigoureuse	Efficace, si tous les principes de l'AC sont appliqués et poursuivis pendant un certain temps. Contrairement aux autres ravageurs, la chenille légionnaire d'automne ne peut être contrôlée par le brûlage des résidus de cultures. Note: L'AC peut réduire l'accès des plantes à l'azote si cela est limité, ce qui pourrait réduire la santé et la vigueur des plantes et augmenter les taux d'attaque des ravageurs. Ceci peut être évité en ajoutant de l'engrais ou en mettant en place des cultures intercalaires à base d'arbres fertilitaires (<i>par ex.</i> : l'AC avec l'agro-foresterie)	Moyen: certains outils et intrants spécifiques peuvent être nécessaires pour établir des systèmes de AC efficaces.	Agents de vulgarisation, producteurs agricoles, négociants agricoles	All (1988) ; Tillman <i>et al.</i> (2004) ; Rivers <i>et al.</i> (2016)

(suite de la page 94)

(suite de la page 93)

Tableau 1 (suite). Options de lutte culturales et de gestion paysagère recommandées pour la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique.

Méthode	Description	Efficacité	Coût financier	Acteurs pertinents	Preuves scientifiques et renseignements complémentaires
Augmenter la Couverture végétale	Les plante de couverture telles que le mucuna, les haricots lablab, le pois sabre , la crotalaire effilée, etc., contribuent à la diversité des espèces végétales qui favorisent les activités biologiques et fournissent un abri aux ennemis naturels (araignées, coléoptères, fourmis).	L'utilisation d'une gamme de cultures de couverture peut être efficace comme cultures pièges, cultures insectifuges qui interrompent la ponte et le développement larvaire, et comme abri pour les ennemis naturels.	Moyen: Disponibilité des semences et la convenance des plantes de couverture	Agents de vulgarisation, agriculteurs, communautés (à l'échelle du paysage)	Altieri <i>et al.</i> (2012) ; Bugg, <i>et al.</i> (1991) ; Hoballah <i>et al.</i> (2004) ; Ratnadass <i>et al.</i> (2011) ; Meagher <i>et al.</i> (2004) ; Wyckhuys et O'Neil (2007)
Haies et clôtures vives	Les systèmes de culture complexes influencent les interactions du biotope et augmentent l'efficacité des parasitoïdes. Fournissent une diversité et des habitats supplémentaires aux ennemis naturels pour proliférer et contribuer à la lutte contre les ravageurs (oiseaux, araignées, fourmis). La plantation de clôtures ou de haies vives, l'entretien des zones non cultivées, le désherbage en partie ou en totalité de la culture, la plantation d'autres cultures ou arbres fruitiers dans les champs voisins.	Les champs proches des haies sont habituellement moins infestés de ravageurs en raison des activités d'agents de lutte biologique (oiseaux).	Moderé à élevé: des terres supplémentaires peuvent être nécessaires pour établir des haies	Agents de vulgarisation, producteurs agricoles, communautés (à l'échelle du paysage)	Veres <i>et al.</i> (2013) ; Landis <i>et al.</i> (2000) ; Martin <i>et al.</i> (2016) ; Marino et Landis (1996) ; Wyckhuys et O'Neil (2007)
Améliorer les systèmes agroforestiers au niveau du paysage	Planter des arbres / arbustes entre le maïs, en particulier neem, Tephrosia, Gliricidia, Faidherbia albida, etc., pour accroître la diversité des ennemis naturels (insectes utiles et oiseaux).	Une intervention à long terme pour créer la biodiversité et la lutte biologique contre les ravageurs - peut être très efficace une fois les arbres établis.	Moyen: les terres doivent être partagées avec les cultures principales.	Agents de vulgarisation, agriculteurs, décideurs politiques, communautés (à l'échelle du paysage)	Wyckhuys and O'Neil (2006) ; Wyckhuys and O'Neil (2007) ; Hay-Roe <i>et al.</i> (2016) ; Ratnadass <i>et al.</i> (2011)

Note: Ce tableau est une adaptation du document intitulé CABI Evidence Note (2017).



Figure 4. Options de cultures intercalaires potentielles pour atténuer les dommages de la chenille légionnaire d'automne. (Source: Christian Thierfelder, CIMMYT).

2.2. Pratiques nécessitant des preuves de recherches supplémentaires

Les pratiques suivantes ont besoin données supplémentaires avant d'être largement recommandées pour la gestion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique, en particulier dans le contexte des petits producteurs:

- Épandage de l'eau sucrée sur les feuilles de maïs. Bien que dans certains cas cette pratique ait été recommandée, l'efficacité, la praticabilité et le coût doivent être établis.
- Mettre de la cendre/du sable/de la terre ou la poudre du chili sur les verticilles de maïs. Bien que toutes ces pratiques soient testées par certains petits producteurs d'Afrique, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur l'efficacité et l'extension à grande échelle, ainsi que sur le mécanisme qui est à l'origine de leur probable effet sur la chenille légionnaire d'automne.
- Le labour en profondeur. Le labour peut tuer des pupes dans le sol. Toutefois, les sols sont normalement labourés avant que la chenille légionnaire d'automne n'arrive dans un champ ; Le labour peut donc causer plus de mal que de bien, en réduisant l'activité biologique et en augmentant la dégradation des sols tout en contribuant relativement peu à la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en raison de l'inadéquation entre la période d'intervention et la dynamique de population du ravageur. Son effet n'est donc pas concluant et devrait faire l'objet d'une enquête approfondie.

Limitation des connaissances/domaines de recherche

But: Établir une base solide de preuves concernant l'efficacité du contrôle et du coût des options de lutte agroécologique et culturale pour la gestion de la chenille légionnaire d'automne en Afrique.

1. Comment la date de semis affecte-t-elle l'incidence et l'abondance de la chenille légionnaire d'automne et les dégâts qui en résultent?
2. Comment l'agriculture de conservation affecte-t-elle l'incidence et l'abondance de la chenille légionnaire d'automne, et les dégâts qui en résultent? Quels sont les mécanismes?
3. Comment la présence de plantes d'accompagnement (cultures intercalaires et système Push-Pull) affecte-t-elle l'incidence et l'abondance de la chenille légionnaire d'automne, et les dégâts qui en résultent? Quels sont les mécanismes: (i) réduction du mouvement des larves? (ii) réduction du taux de ponte, ou (iii) une augmentation de la prédation et du parasitisme?
4. Comment la diversité de l'habitat (y compris la couverture forestière) à l'échelle du champ, de la ferme et du paysage influe-t-elle sur l'incidence et l'abondance de la chenille légionnaire d'automne, et les dommages résultants aux récoltes? Quels sont les mécanismes?

Messages clés aux décideurs

1. Augmenter la diversité au niveau du champ, de la ferme et du paysage. Le gouvernement Zambien a récemment publié une politique de diversification qui pourrait être examinée par d'autres gouvernements africains.
2. Le Malawi encourage l'agroforesterie en tant que solution à la dégradation des terres ; cela pourrait éventuellement être lié aux efforts de contrôle du ravageur.
3. Relier les groupes de travail nationaux et régionaux avec les partenaires au développement mondiaux de gestion de la chenille légionnaire d'automne pour un plaidoyer efficace et la mise en œuvre.
4. Compte tenu des nouvelles données probantes sur les impacts positifs du système Push-Pull sur l'atténuation de la chenille légionnaire d'automne, cette technologie pourrait être considérée pour un certain niveau d'intensification en Afrique. C'est un élément clé de l'unité de transfert de technologie de l'ICIPE, en partenariat avec les systèmes nationaux de recherche agricole et les gouvernements africains. Pour accéder aux matériels de formation, d'audio diffusion et d'autres informations, prière visitez www.push-pull.net.

Références

Chapitre 1

- Agunbiade TA, Sun W, Coates BS, Traore F, Ojo JA, Lutomia AN, Bravo JB, Miresmaili S, Huesing JE, Tamò M, Pittendrigh BR (2017) Chapitre 11. Cowpea Field Insect Pests and Integrated Pest Management Techniques for Cowpea Cultivation in West Africa. In: Achieving Sustainable Cultivation of Grain Legumes (eds. Sivasankar *et al.*) Publisher: Burleigh Dodds Science Publishing.
- Ashley TR, Wiseman BR, Davis FM, Andrews KL (1989) The fall armyworm: a bibliography. *Florida Entomologist* 72: 152-202.
- Barbercheck ME, Zaborski E (2015) Insect pest management: Differences between conventional and organic farming systems. <http://articles.extension.org/pages/19915/insect-pest-management-differences-between-conventional-and-organic-farming-systems>
- Capinera JL (1999) Fall Armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Insecta: Lepidoptera: Noctuidae). University of Florida IFAS Extension Publication EENY-098. Publié en juillet 1999. Révisé en Novembre 2005. Modifié en Février 2014.
- Cock MJW, Besah PK, Buddie AG, Cafá G, Crozier J (2017) Molecular methods to detect *Spodoptera frugiperda* in Ghana, and implications for monitoring the spread of invasive species in developing countries. *Scientific Reports* 7: 4103. DOI:10.1038/s41598-017-04238-y
- Dumas P, Legeai F, Lemaitre C, *et al.* (2015a) *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) host-plant variants: two host strains or two distinct species? *Genetica* 143: 305-316. <https://doi.org/10.1007/s10709-015-9829-2>
- Dumas P, Barbut J, Le Ru B, Silvain JF, Clamens AL, d'Alençon E, *et al.* (2015b) Phylogenetic molecular species delimitations unravel potential new species in the pest genus *Spodoptera* Guenée, 1852 (Lepidoptera, Noctuidae). *PLoS ONE* 10(4): e0122407. doi:10.1371/journal.pone.0122407
- Goergen G, Kumar PL, Sankung SB, Togola A, Tamò M (2016) First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa. *PLoS ONE*, DOI: 10.1371/journal.pone.0165632.
- Gouin A, Bretaudeau A, Nam K, *et al.* (2017) Two genomes of highly polyphagous lepidopteran pests (*Spodoptera frugiperda*, Noctuidae) with different host-plant ranges. *Scientific Reports* 7: 11816. DOI:10.1038/s41598-017-10461-4
- Hunt TE, Wright RJ, Hein GL (2009) Extension Entomology Specialist Economic Thresholds for Today's Commodity Values. Adapted from Proceedings of the UNL Crop Production Clinics, pp. 93-96. <https://cropwatch.unl.edu/documents/Economic%20Thresholds.pdf>.
- OECD (1999) Environmental Health and Safety Publications. Series on Pesticides No. 8. Report of the OECD/FAO Workshop on Integrated Pest Management and Pesticide Risk Reduction.
- Luginbill P (1928) The Fall Armyworm. USDA Bulletin technique 34. 91 pp.
- Pitre HN, Hogg DB (1983) Development of the fall armyworm on cotton, soybean and corn. *Journal of the Georgia Entomological Society* 18: 187-194.
- Nagoshi RN, Koffi D, Agboka K, Tounou KA, Banerjee R, Jurat-Fuentes JL, *et al.* (2017) Comparative molecular analyses of invasive fall armyworm in Togo reveal strong similarities to populations from the eastern United States and the Greater Antilles. *PLoS ONE* 12(7): e0181982. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181982>
- Rose AH, Silversides RH, Lindquist OH (1975) Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lep.: Noctuidae). *Canadian Entomol.* 107: 567-576.
- Sekul AA, Sparks AN (1976) Sex attractant of the fall armyworm moth. USDA Technical Bulletin 1542. 6 pp. Sparks AN (1979) A review of the biology of the fall armyworm. *Florida Entomologist* 62: 82-87.

Chapitre 3

- Ajayi OC, Akinnifesi FK (2007) Farmers' understanding of pesticide safety labels and field spraying practices: a case study of cotton farmers in Northern Cote d'Ivoire. *Scientific Research and Essays* 2: 204-210.
- BgVV (Bundesinstitut Für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin) (2000) Risk communication for chemical risk management: an OECD background paper. BgVV, Berlin. 252 p.
- Day R, Abrahams P, Bateman M, Beale T, Clotey V, Cock M, Colmenarez Y, Corniani N, Early R, Godwin J, Gomez J, Gonzalez Moreno P, Murphy ST, Oppong-Mensah B, Phiri N, Pratt C, Silvestri S, Witt A (2017) Fall armyworm: impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management* 28:196-201. DOI: 10.1564/v28_oct_02.
- De Bon H, Huat J, Parrot L, Sinzogan A, Martin T, Malézioux E, Vayssères J-F (2014) Pesticide risks from fruit and vegetable pest management by small farmers in sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 723-736. DOI: 10.1007/s13593-014-0216-7
- Donald CE, Scott RP, Blaustein K, Halbleib ML, Sarr M, Jepson PC, Anderson KA (2016) Silicone wristbands detect individuals' pesticide exposures in West Africa. *Royal Society Open Science* 3: 160433. DOI: 10.1098/rsos.160433
- FAO (2014) International code of conduct on pesticide management. Disponible en ligne à: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/pests/code/en/>
- Farrar JJ, Ellsworth PC, Sisco R, Baur ME, Crump A, Fournier AJ, Murray MK, Tarutani CM, Dorschner KW, Jepson PC (2018) Assessing the compatibility of a pesticide in an Integrated Pest Management program. *Journal of Integrated Pest Management* (in press)
- Halbleib ML, Jepson PC (2016) Adaptive, learner-centered education: a toolkit for extension. EM 9144, Oregon State Extension Service. Disponible en ligne à: <https://catalog.extension.oregonstate.edu/em9144>
- Jepson PC (2007) Ecotoxicology and IPM. In: Kogan M, Jepson PC (Eds.) *Perspectives in Ecological Theory and Integrated Pest Management*. Cambridge University Press, UK, pp 522-551.
- Jepson PC (2009) Assessing environmental risks of pesticides In: Radcliffe EB, Hutchinson WD, Cancelado RE (Eds.) *Integrated Pest Management: Concepts, Strategies, Tactics and Case Studies*. Cambridge University Press, UK, pp 205-220.
- Jepson PC, Guzy M, Blaustein K, Sow M, Sarr M, Mineau P, Kegley S (2014) Measuring pesticide ecological and health risks in West African agriculture to establish an enabling environment for sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 369: 20130491. DOI: 10.1098/rstb.2013.0491
- Maumbe BM, Swinton SM (2003) Hidden health costs of pesticide use in Zimbabwe's smallholder cotton growers. *Social Science and Medicine* 57: 1559-1571. DOI: 10.1016/S0277-9536(03)00016-9
- OECD (2002) OECD guidance document on risk communication for chemical risk management. OECD, Paris. ENV/JM/MONO(2002)18
- Parsa S. *et al.* (2014) Obstacles to integrated pest management adoption in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 3889-3894. DOI: 10.1073/pnas.1312693111
- Pretty J, Bharucha ZP (2015) Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects* 6: 152-182. DOI: 10.3390/insects6010152
- SAN (2016) Sustainable Agriculture Standard for farms and producer groups, crop and cattle production (version 1.2 Juillet 2017). Réseau de l'agriculture durable. San José, Costa Rica.
- SAN (2017) SAN Lists for Pesticide Management – Lists of Prohibited and Risk Mitigation Use Pesticides of the SAN 2017 Sustainable Agriculture Standard for farms' and producer groups' crop and cattle production (version 1.3). San José, Costa Rica.
- Settle W, Soumare M, Sarr M, Garba MH, Poisot A-S (2014) Reducing pesticide risks to farming communities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 369: 20120277. DOI: 10.1098/rstb.2012.0277
- Sherratt TN, Jepson PC (1993) A metapopulation approach to modelling the long-term impact of pesticides on invertebrates. *Journal of Applied Ecology* 30: 696-705.
- Williamson S, Ball A, Pretty J (2008) Trends in pesticide use and drivers for safer pest management in four African countries. *Crop Protection* 27: 1327-1334. DOI: 10.1016/j.cropro.2008.04.006

Chapitre 4

- Cave RD (2000) Biology, ecology and use in pest management of *Telenomus remus*. *Biocontrol News and Information* 21: 21-26.
- Chandrasena DI, Signorini AM, Abratti G, Storer NP, Olaciregui ML, Alves AP, Pilcher CD (2017) Characterization of field-evolved resistance to *Bacillus thuringiensis*-derived Cry1F δ -endotoxin in *Spodoptera frugiperda* populations from Argentina. *Pest Management Science* Publié en ligne ; doi: 10.1002/ps.4776].
- Chapman JW, Williams T, Escribano A, Caballero P, Cave RD, Goulson D (1999). Age-related cannibalism and horizontal transmission of a nuclear polyhedrosis virus in larval *Spodoptera frugiperda*. *Ecological Entomology* 24: 268-275.
- CropLife (2012) Practical Approaches to Insect Resistance Management for Biotech-Derived Crops. <https://croplife.org/wp-content/uploads/2014/04/IRM- Manual de formation- -FINAL-Janvier-2012.pdf>
- Davis FM, Williams WP (1992) Visual rating scales for screening whorl-stage corn for resistance to fall armyworm. Mississippi Agricultural & Forestry Experiment Station, Bulletin Technique 186, Université d'état de Mississippi, MS39762, USA.
- Elias LA (1970) Maize resistance to stalk borers in *Zea-diatraea* Box and *Diatraea* Guilding at five localities in Mexico. Thèse de doctorat (Ph.D.). Université d'état de Kansas, 172 pp.
- Farias JR, Andow DA, Horikoshi RJ, Sorgatto RJ, Fresia P, Santos AC, Omoto C (2014) Field-evolved resistance to Cry1F maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. *Crop Protection* 64: 150-158.
- Gerdes JT, Behr CF, Coors JG, Tracy WF (1993) Compilation of North America Maize Breeding Germplasm. *Crop Science Society of America*, 202 p.
- Gernert WB (1917) Aphids immunity of teosinte-corn hybrids. *Science* 46: 390–392.
- Hinds WE (1914) Reducing insect injury in stored corn. *Journal of Economic Entomology* 7:203–211 Horikoshi RJ, Bernardi D, Bernardi O, Malaquias JB, Okuma DM, Miraldo LL, eAmaral FSDA, Omoto C (2016) Effective dominance of resistance of *Spodoptera frugiperda* to *Bt* maize and cotton varieties: implications for resistance management. *Scientific Reports* 6: 34864.
- Huang F, Qureshi JA, Meagher RL Jr, Reisig DD, Head GP, *et al.* (2014) Cry1F Resistance in Fall Armyworm *Spodoptera frugiperda*: Single gene versus pyramided *Bt* maize. *PLoS ONE* 9(11): e112958. doi:10.1371/journal.pone.0112958.
- Huber LL, Neiswander CR, Salter RM (1928) The European corn borer and its environment. *Ohio Exp. Stn. Bull.* 429: 5-193.
- Martínez ML, Cortes EP, López RJ, Sánchez-García JA, Cisneros-Palacios ME (2015) Performance of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Smith), fed with corn and castor bean leaves. *Entomologia Mexicana* 2: 397-403.
- Mihm JA (ed.) (1997) Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization ; Proceedings of an International Symposium held at the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) 27 Novembre-3 Decembre, 1994. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Ni X, Xu W, Blanco MH and Williams PW (2014) Evaluation of fall armyworm resistance in maize germplasm lines using visual leaf injury rating and predator survey. *Insect Science* 21: 541-555.
- Onyango FO, Ochieng'-Odero JPR (1994) Continuous rearing of the maize stem borer *Busseola fusca* on an artificial diet. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 73: 139–144.
- Ortega A, Vasal SK, Mihm J, Hershey C (1980) Breeding for insect resistance in maize. In: Maxwell FG, Jennings PR (ed) *Breeding Plants Resistant to Insects*. Wiley, New York, pp. 371-419.
- Peairs FB (1977) Plant damage and yield response to *Diatraea saccharalis* (F.) and *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in selection cycles of two tropical maize populations in Mexico. Thèse de Doctorat (Ph.D). Univ. Cornell, Ithaca, NY, 176p.
- Polaszek A (1998) African Cereal Stem Borers: Economic Importance, Taxonomy, Natural Enemies and Control. Wallingford: CABI Publishing, 530 p.
- Scott GE, Davis FM (1981) Registration of Mp496 inbred of maize. *Crop Science* 21:353.
- Scott GE, Davis FM, Williams WP (1982) Registration of Mp701 and Mp702 germplasm lines of maize. *Crop Science* 22:1275.

- Siegfried BD, Spencer T, Crespo AL *et al.* (2007). Ten years of *Bt* resistance monitoring in the European Corn Borer: What we know, what we don't know, and what we can do better. *American Entomologist* 53: 208–214.
- Songa JM, Bergvinson D, Mugo S (2004) Mass rearing of maize stem borers *Chilo partellus*, *Busseola fusca*, *Sesamia calamistis*, *Chilo orichacocillielus* and *Eldana saccharina* at KARI, Katumani. Proceedings of the 7^e Conférence Régionale de l'Afrique de l'Est et du Sud sur le maïs, Nairobi, Kenya, 11-15 Février 2002, pp. 120-124.
- Storer NP, Babcock JM, Schlenz M, Meade T, Thompson GD, Bing JW, Huckaba RM (2010) Discovery and characterization of field resistance to *Bt* maize: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Puerto Rico. *Journal of Economic Entomology* 103: 1031–1038.
- Tefera T, Mugo S, Tende R, Likhayo P (2011) Mass Rearing of Stem Borers, Maize Weevil, and Larger Grain Borer Insect Pests of Maize. CIMMYT: Nairobi, Kenya.
- Valicente FH, Tuelher ES, Pena RC, Andrezza R, Guimarães MRF (2013) Cannibalism and virus production in *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) larvae fed with two leaf substrates inoculated with *Baculovirus spodoptera*. *Neotropical Entomology* 42: 191–199.
- Viana PA, Guimaraes PEO (1997) Maize resistance to lesser corn stalk borer and fall armyworm in Brazil. In: *Insect Resistant Maize: Recent Advances and Utilization*; Proceedings of an International Symposium held at CIMMYT, 27 November-3 December, 1994. Mexico, D.F.: CIMMYT, pp. 112-116.
- Viana PA, Guimarães PEO, Gonçalves ID, Magalhães CD (2016) Resistência nativa de híbridos experimentais de milho à *Spodoptera frugiperda*. XXX Congresso Nacional de Milho e Sorgo, Salvador-BA Brasil. Williams WP, Davis FM (1980) Registration of Mp703 germplasm line of maize. *Crop Science* 20: 418. Williams WP, Davis FM (1982) Registration of Mp704 germplasm line of maize. *Crop Science* 22: 1269-1270.
- Williams WP, Davis FM (1984) Registration of Mp705, Mp706, and Mp707 germplasm lines of maize. *Crop Science* 24: 1217.
- Williams WP, Davis FM (2000) Registration of maize germplasm lines Mp713 and Mp714. *Crop Science* 40: 584.
- Williams WP, Davis FM (2002) Registration of maize germplasm line Mp716. *Crop Science* 42: 671-672.
- Williams WP, Davis FM, Windham GL (1990) Registration of Mp708 germplasm line of maize. *Crop Science* 30: 757.
- Zhao JZ *et al.* (2003) Transgenic plants expressing two *Bacillus thuringiensis* toxins delay insect resistance evolution. *Nature Biotechnology* 21: 1493–1497.

Chapitre 5

- Almeida RP de, Cruz I, Silva CAD (2013) La Lutte biologique contre les ravageurs du cotonnier avec utilisation du *Trichogramma* spp. In: Almeida RP de, Cruz I (Eds.) *Technologie de production de Trichogramma spp. pour la lutte biologique contre les Lépidoptères-ravageurs*. Brasília, DF: Embrapa, pp. 17-22.
- Almeida RP de, Cruz I (Eds.) (2013) *Technologie de production de Trichogramma spp. pour la lutte biologique contre les lépidoptères-ravageurs*. Brasília, DF: Embrapa, 83 p.
- Alves SB, Lopes RB, Vieira SA, Tamai, MA (2008) Fungos entomopatogênicos usados no controle de pragas na América Latina. In: Alves SB (Ed). *Controle microbiano de pragas na América Latina: avanços e desafios*. Piracicaba: FEALQ, p. 69-110.
- Alves TJS, Cruz GS, Wanderley-Teixeira V, Teixeira AAC, Oliveira JV, Correia AA, *et al.* (2014) Effects of *Piper hispidinervum* on spermatogenesis and histochemistry of ovarioles of *Spodoptera frugiperda*. *Biotechnic & Histochemistry* 89: 245-255.
- Ansante TF, Prado Ribeiro L, Bicalho KU, Fernandes JB, Vieira PC, Vendramim JD (2015) Secondary metabolites from Neotropical Annonaceae: Screening, bioguided fractionation, and toxicity to *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Industrial Crops and Products* 74: 969-976.
- Barrera G, Simón O, Villamizar L, Williams T, Caballero P (2011) *Spodoptera frugiperda* multiple nucleopolyhedrovirus as a potential biological insecticide: Genetic and phenotypic comparison of field isolates from Colombia. *Biological Control* 58: 113-120.
- Barreto MR, Loguercio LL, Valicente FH, Paiva E (1999) Insecticidal activity of culture supernatants from *Bacillus thuringiensis* Berliner strains against *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) larvae. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil* 28: 675-685.

- Behle RW, Popham HJ (2012) Laboratory and field evaluations of the efficacy of a fast-killing baculovirus isolate from *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Invertebrate Pathology* 109: 194-200.
- Bharadwaj RK (1966) Observation on the bionomics of *Euborellia annulipes* (Dermaptera: Labiduridae). *Annals of the Entomological Society of America* 59: 441-450.
- Bratti (1993) In vitro rearing of *Lydella thompsoni* Herting and *Archytas marmoratus* (Town.)(Dip. Tachinidae) larval stages: preliminary results. *Boll. 1st. Ent. Univ. Bologna* 48: 93-100.
- Bullangpoti V, Wajnberg E, Audant P, Feyereisen R (2012) Antifeedant activity of *Jatropha gossypifolia* and *Melia azedarach* senescent leaf extracts on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and their potential use as synergists. *Pest Management Science* 68: 1255-1264.
- Buttler Júnior GD, Lopez JD (1980) *Trichogramma pretiosum*: Development in two hosts in relation to constant and fluctuating temperatures. *Annals of the Entomological Society of America* 73: 671-673.
- Cardoso JT, Lázzari SM (2003) Comparative biology of *Cycloneda sanguinea* (Linnaeus, 1763) and *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville, 1842. (Coleoptera, Coccinellidae) focusing on the control of *Cinara* spp. (Hemiptera: Aphididae). *Revista Brasileira de Entomologia* 47: 443-446.
- Carpenter JE, Proshold FI (2000). Survival of *Archytas marmoratus* (Diptera: Tachinidae) from superparasitized corn earworm larvae (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology* 29: 606- 611.
- Céspedes CL, Calderón JS, Lina L, Aranda E (2000) Growth inhibitory effects on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* of some limonoids isolated from *Cedrela* spp. (Meliaceae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 1903-1908.
- Céspedes CL, Salazar JR, Martínez M, Aranda E (2005) Insect growth regulatory effects of some extracts and sterols from *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) against *Spodoptera frugiperda* and *Tenebrio molitor*. *Phytochemistry* 66: 2481.
- Champlain RA, Sholdt L (1967) Life history of *Geocoris punctipes* (Hemiptera: Lygaeidae) in the laboratory. *Annals of the Entomological Society of America* 60: 881-883.
- Choate PM (2001) The earwigs (Dermaptera) of Florida and eastern United States. <https://entnemdept.ifas.ufl.edu/choate/dermaptera.pdf>
- Chazeau J, Bouye E, de Larbogne LB (1991) Development and life table of *Olla v-nigrum* (Col.: Coccinellidae), a natural enemy of *Heteropsylla cubana* (Hom.: Psyllidae) introduced in New Caledonia. *Entomophaga* 36: 275-285.
- Cisneros J., Pérez J.A., Penagos D.I., Ruiz J., Goulson D., Caballero P., Cave R.D. and Williams, T. 2002. Formulation of a nucleopolyhedrovirus with boric acid for control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. *Biological Control* 23: 87-95.
- Cogni R, Freitas AVL, Filho FA (2000) Influence of prey size on predation success by *Zelus longipes* L. (Hemiptera: Reduviidae). *Journal of Applied Entomology* 126: 74-78.
- Coll M, Ridgeway LR (1995) Functional and numerical response of *Orius insidiosus* (Heteroptera: Anthrocoridae) to its prey in different vegetable crops. *Annals of the Entomological Society of America* 88: 732-738.
- Cruz I (2000) Utilização do Baculovirus no controle da lagarta-do-cartucho do milho, *Spodoptera frugiperda*. In: Melo, I.S. ; Azevedo, J.L. (Ed.). *Controle biológico*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. cap. 8, p. 201-230.
- Cruz I, Figueiredo MLC, Matoso MJ (2013) Production de *Trichogramma* avec la pyrale de la farine (*Anagasta kuehniella*). In: Almeida RP, Cruz I (Ed.). *Technologie de production de Trichogramma spp. pour la lutte biologique contre les lépidoptères-ravageurs*. Brasília, DF: Embrapa. p. 23-49. (Échange d'expériences sur le cotonnier).
- Cruz I, Figueiredo MLC, Silva RB, Del Sarto ML, Pentead-Dias AM (2009) Monitoramento de parasitoides de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) em municípios de Minas Gerais, Brasil. *Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo*, 2009. 29 p. (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277 ; 92).
- Cruz I, Gonçalves EP, Figueiredo MLC (2002) Effect of a nuclear polyhedrosis virus on *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) larvae, its damage and yield of maize crop. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 1: 20-27.
- Cruz I, Lopes SR, Figueiredo M de LC, Viana PA, Mendes SM (2016) Controle biológico de pragas do milho-doce. In: Pereira Filho IA, Teixeira FF (Ed.). *O cultivo do milho-doce*. Brasília, DF: Embrapa cap. 11, pp. 205-224.
- DeBach P (1964) The scope of biological control. In: DeBach P (Ed.). *Biological Control of Insect Pests and Weeds*, Chapman and Hall Ltd., London, pp. 3-20.

- Etchegaray JB, Nishida T (1975) Biology of *Lespesia archippivora* (Diptera: Tachinidae). Proceedings of Hawaiian Entomological Society 22: 41-49.
- Fargues J, Maniania NK (1992) Variabilité de la sensibilité de *Spodoptera littoralis* à l'hyphomycete entomopathogène *Nomuraea rileyi*. Entomophaga 37: 545-554.
- Fiaboe K, Fernández-Triana J, Nyamu F, Agbodzavu K (2017) *Cotesia icipe* sp. n., a new Microgastrinae wasp (Hymenoptera, Braconidae) of importance in the biological control of Lepidopteran pests in Africa. Journal of Hymenoptera Research 61: 49-64.
- Figueiredo MLC, Martins-Dias AMP, Cruz I (2006a) Associação entre inimigos naturais e *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) na cultura do milho. Revista Brasileira de Milho e Sorgo 5: 340-350.
- Figueiredo MLC, Martins-Dias AMP, Cruz I (2006b) *Exasticolus fuscicornis* em lagartas de *Spodoptera frugiperda*. Pesquisa Agropecuária Brasileira 41: 1321-1323.
- Figueiredo MLC, Cruz I, Pentead-Dias AM, Silva RB (2009) Interaction between *Baculovirus spodoptera* and natural enemies on the suppression of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize. Revista Brasileira de Milho e Sorgo 8: 207-222.
- Fontana Capalbo DM, Valicente FH, Oliveira Moraes ID, Pelizer LH (2001) Solid-state fermentation of *Bacillus thuringiensis tolworthi* to control fall armyworm in maize. Electronic Journal of Biotechnology 4: 9-10.
- Garcia LC, Raetano CG, Leite LG (2008) Application technology for the entomopathogenic nematodes *Heterorhabditis indica* and *Steinernema* sp. (Rhabditida: *Heterorhabditidae* and *Steinernematidae*) to control *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in corn. Neotropical Entomology 37: 305-311.
- Gómez J, Guevara J, Cuartas P, Espinel C, Villamizar L (2013) Microencapsulated *Spodoptera frugiperda* nucleopolyhedrovirus: insecticidal activity and effect on arthropod populations in maize. Biocontrol Science & Technology 23: 829-846.
- Gross HR Jr, Johnson R (1985) *Archytas marmoratus* (Diptera: Tachinidae) advances in large-scale rearing and associated biological studies. Journal of Economic Entomology 78: 1350-1353.
- Haase S, Sciocco-Cap A, Romanowski V (2015) Baculovirus insecticides in Latin America: Historical overview, current status and future perspectives. Viruses 7: 2230-2267.
- Hamm JJ, Shapiro M. (1992) Infectivity of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) nuclear polyhedrosis virus enhanced by a fluorescent brightener. Journal of Economic Entomology 85: 2149-2152.
- Herren HR, Neuenschwander P (1991) Biological control of cassava pests in Africa. Annual Review of Entomology 36: 257-283.
- Isenhour DJ (1985) *Campoletis sonorensis* [Hym.: Ichneumonidae] as a parasitoid of *Spodoptera frugiperda* [Lep.: Noctuidae]: Host stage preference and functional response. Entomophaga 30: 31-36.
- Jalali SK, Singh SP, Ballal CR, Kumar P (1990) Response of *Cotesia marginiventris* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae) to low temperature in relation to its biotic potential. Entomon 15: 217-220.
- Kaya HK, Aguilera MM, Alumai A, Choo HY, de la Torre M, Foder A, Ganguly S, Hazir S, Lakatos T, Pye A, Wilson M, Yamanaka S, Yang H, Ehlers RU (2006) Status of entomopathogenic nematodes and their symbiotic bacteria from selected countries or regions of the world. Biological Control 38: 134-155
- Landge SA, Wakhede SM, Gangurde SM (2009) Comparative biology of *Bracon hebetor* Say on *Corcyra cephalonica* Stainton and *Opisina arenosella* Walker. International Journal of Plant Protection 2: 278-280.
- Lima MLL, van Harten A (1985) Biological control of crop pests in Cape Verde. Current situation and future programmes. Revista Investigacao Agraria, Centro de Estudos Agrarios, A 1: 3-12.
- Lundgren JG, Razzak AA, Wiedenmann RN (2004) Population responses and food consumption by predators *Coleomegilla maculata* and *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) during anthesis in an Illinois cornfield. Environmental Entomology 33: 958-963.
- Macharia I, Löhr B, De Groot H (2005) Assessing the potential impact of biological control of *Plutella xylostella* (diamondback moth) in cabbage production in Kenya. Crop Protection 24: 981-989.
- Manjunath TM (1972) Biological studies on *Trichogramma armigera* Nagaraja a new dimorphic egg parasite of *Heliothis armigera* (Hübner) in India. Entomophaga 17: 131-147.

- Matos Neto FC, Cruz I, Zanuncio JC, Silva CHO, Picanço MC (2004) Parasitism by *Campoletis flavicincta* on *Spodoptera frugiperda* in corn. Pesquisa Agropecuária Brasileira 39: 1077-1081.
- Matrangolo WJR, Penteado-Dias AM, Cruz I (2007) Aspectos biológicos de *Campoletis flavicincta* (Ashmead) (Hymenoptera: Ichneumonidae) e interações com o vírus da poliedrose nuclear de *Spodoptera frugiperda*. Revista Brasileira de Milho e Sorgo 6: 1-16.
- Meagher RL Jr, Nuessly GS, Nagoshi RN, Hay-Roe MM (2016) Parasitoids attacking fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in sweet corn habitats. Biological Control 95: 66-72.
- Mikolajczak KL., Zilkowski BW., & Bartelt RJ. (1989) Effect of meliaceous seed extracts on growth and survival of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith). Journal of Chemical Ecology 15: 121-128.
- Molina-Ochoa J, Carpenter JE, Heinrichs EA, Foster JE (2003) Parasitoids and parasites of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas and Caribbean Basin: an inventory. Florida Entomologist 86: 254-289.
- Molina-Ochoa J, Lezama-Gutierrez R, Hamm JJ, Wiseman BR, Lopez-Edwards M (1999) Integrated control of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) using resistant plants and entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae). Florida Entomologist 82: 263-271.
- Monnerat R., Martins E., Queiroz P., Ordúz S., Jaramillo G., Benintende G., Cozzi J., Real M.D., Martinez- Ramirez A., Rausell C. and Cerón J (2006) Genetic variability of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) populations from Latin America is associated with variations in susceptibility to *Bacillus thuringiensis* Cry toxins. Applied and Environmental Microbiology 72: 7029-7035.
- Moscardi F (1999) Assessment of the application of baculoviruses for control of Lepidoptera. Annual Review of Entomology 44: 257-289.
- Moscardi F, de Souza ML, de Castro MEB, Moscardi ML, Szweczyk B (2011) Baculovirus pesticides: present state and future perspectives. In: Microbes and Microbial Technology. Springer New York, pp. 415-445.
- Mugisha-Kamatanesi M, Deng AL, Ogendo JO, Omolo EO, Mihale MJ, Otim M, Buyungo JP, Bett PK (2008) Indigenous knowledge of field insect pests and their management around Lake Victoria basin in Uganda. African Journal of Environmental Science and Technology 2: 342-348.
- Mukerji MK, LeRoux EJ (1965) Laboratory rearing of a Quebec strain of the pentatomid predator *Podisus maculiventris* (Say) (Hemiptera: Pentatomidae). Phytoprotection 46: 40-60.
- Mushobozi W, Grzywacz D, Moscardi F, Wilson K (2006) The African Armyworm *Spodoptera exempta* nucleopolyhedrovirus (NPV) production and application manual. Accessed from <http://www.fao.org/docs/eims/upload/agrotech/1915/R8408-Appendix-4.pdf>
- Negrisoni AS, Garcia MS, Negrisoni CRCB (2010a) Compatibility of entomopathogenic nematodes (Nematoda: Rhabditida) with registered insecticides for *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) under laboratory conditions. Crop Protection 29: 545-549.
- Negrisoni AS, Garcia MS, Negrisoni CRCB, Bernardi D, da Silva A (2010b) Efficacy of entomopathogenic nematodes (Nematoda: Rhabditida) and insecticide mixtures to control *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) in corn. Crop Protection 29: 677-683.
- Ogendo JO, Deng AL, Omollo EO, Matasyoh JC, Tuey RK, Khan ZR (2013) Management of stem borers using selected botanical pesticides in a maize-bean cropping system. Egerton Journal of Science & Technology 13: 21-38.
- Paiva CEC (2013) Multiplicação de *Spodoptera frugiperda* multiple nucleopolyhedrovirus (SfMNPV) em lagartas de *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). MSc thesis. Universidade Federal de Vicosa, 76p.
- Pasini A (1995) Biologia e técnica de criação do predador *Calosoma granulatum* Perty, 1830 (Coleoptera: Carabidae), em *Anticarsia gemmatalis* Hübner, 1818 (Lepidoptera: Noctuidae), lagarta-da-soja. Piracicaba: ESALQ, 66p.
- Pasini A, Parra JR, Lopes JM (2007) Artificial diet for rearing *Doru luteipes* (Scudder)(Dermaptera: Forficulidae), a predator of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith)(Lepidoptera: Noctuidae). Neotropical Entomology 36: 308-311.
- Polanczyk RA, Silva RFPD, Fiuza LM (2000) Effectiveness of *Bacillus thuringiensis* strains against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Brazilian Journal of Microbiology 31: 164-166.

- Pomari AF, Bueno AF, Bueno RCOF, Menezes AO Jr (2013) *Telenomus remus* Nixon egg parasitization of three species of *Spodoptera* under different temperatures. *Neotropical Entomology* 42: 399-406.
- Ramos-López MA, Pérez S, Rodríguez-Hernández GC, Guevara-Fefer P, Zavala-Sanchez MA (2010) Activity of *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *African Journal of Biotechnology* 9: 1359-1365.
- Reis LL, Oliveira LJ, Cruz I (1988) Biologia e Potencial de *Doru luteipes* no Controle de *Spodoptera frugiperda*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 23: 333-342.
- Rezende MAA, Cruz I, Della Lucia TMC (1994) Consumo foliar de milho e desenvolvimento de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (Smith) parasitadas por *Chelonus insularis* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil* 23: 473-478.
- Rezende MAA, Cruz I, Della Lucia TMC (1995a) Aspectos biológicos do parasitoide *Chelonus insularis* (Cresson) (Hymenoptera, Braconidae) criados em ovos de *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera, Noctuidae). *Revista Brasileira de Zoologia* 12: 779-784.
- Rezende MAA, Della Lucia TMC, Cruz I (1995b) Comportamento de lagartas de *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) parasitadas por *Chelonus insularis* (Hymenoptera, Braconidae) sobre plantas de milho. *Revista Brasileira de Entomologia* 39: 675-681.
- Shapiro-Ilan DI, Gouge DH, Piggott SJ, Fife JP (2006) Application technology and environmental considerations for use of entomopathogenic nematodes in biological control. *Biological Control* 38: 124- 133.
- Silva RB, Cruz I *et al.* (2010) Parasitismo de *Winthemia trinitatis* Thompson (Diptera: Tachinidae) sobre lagartas de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Empresa Brasileira DE Pesquisa Agropecuária*.
- Silva SMB, Silva-Werneck JO, Falcão R, Gomes AC, Fragoso RR, Quezado MT, Neto OBO *et al.* (2004) Characterization of novel Brazilian *Bacillus thuringiensis* strains active against *Spodoptera frugiperda* and other insect pests. *Journal of Applied Entomology* 128: 102-107.
- Soul-kifouly GM, Affognon HD, Macharia I, Ong'amo G, Abonyo E, Ogola G, De Groot H, LeRu B (2016) Assessing the long-term welfare effects of the biological control of cereal stemborer pests in East and Southern Africa: Evidence from Kenya, Mozambique and Zambia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230: 10-23.
- Stevenson PC, Isman MB, Belmain SR (2017) Pesticidal plants in Africa: a global vision of new biological control products from local uses. *Industrial Crops and Products*. Publié en line: doi.org/10.1016/j. indcrop.2017.08.034.
- Subramanian S, Santharam G, Sathiah N, Kennedy JS, Rabindra RJ (2006) Influence of incubation temperature on productivity and quality of *Spodoptera litura* nucleopolyhedrovirus. *Biological Control* 37(3): 367-374.
- Tamaki G, Weeks RE (1972) Efficiency of three predators, *Geocoris bullatus*, *Nabis americanoferus*, and *Coccinella transversoguttata*, used alone or in combinations against three insect prey species, *Myzus persicae*, *Ceramica picta*, and *Mamestra configurata*, in a greenhouse study. *Environmental Entomology* 1: 258-263.
- Tavares WS, Cruz I, Petacci F, de Assis Júnior SL, Sousa Freitas S, Zanuncio JC, Serrão JE (2009) Potential use of Asteraceae extracts to control *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and selectivity to their parasitoids *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) and *Telenomus remus* (Hymenoptera: Scelionidae). *Industrial Crops and Products* 30: 384-388.
- Tavares WS, Costa MA, Cruz I, Silveira RD, Serrão JE, Zanuncio JC (2010) Selective effects of natural and synthetic insecticides on mortality of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its predator *Eriopis connexa* (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Environmental Science and Health Part B* 45: 557-561.
- Valicente FH (1988) Consumo foliar da lagarta do cartucho do milho, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) infectada com vírus da granulose ou de poliedrose nuclear. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil* 17: 347-357.
- Valicente FH, Cruz I (1991) Controle biológico da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com o Baculovirus. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 23p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular técnica, 15).
- Valicente FH, Tuelher ES (2009) Controle biológico da lagarta do cartucho, *Spodoptera frugiperda*, com Baculovirus. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 14 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 114).
- Valicente FH, Tuelher ES, Barros EC (2010) Processo de formulação do *Baculovirus spodoptera* em pó molhável. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 5 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 156).

van Harten A (1991) Influence of parasitoids on the mortality of pests in vegetable cultivation in Cape Verde. *Journal of Applied Entomology* 111: 521-525.

Wraight SP, Ramos ME, Avery PB., Jaronski ST, Vandenberg JD (2010) Comparative virulence of *Beauveria bassiana* isolates against lepidopteran pests of vegetable crops. *Journal of Invertebrate Pathology* 103: 186-199.

Chapitre 6

All N (1988) Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) infestations in no-tillage cropping systems. *The Florida Entomologist* 71: 268-272.

Altieri MA, Nicholls CI (2003) Soil fertility management and insect pests: Harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 72: 203-211.

Altieri MA, Funes-Monzote FR, Petersen P (2012) Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 1-13.

Bugg RL, Wäckers FL, Brunson KE, Dutcher JD, Phatak SC (1991) Cool-season cover crops relay intercropped with cantaloupe: influence on a generalist predator, *Geocoris punctipes* (Hemiptera: Lygaeidae). *Journal of Economic Entomology* 84: 408-416.

Chapin FS (1991) Integrated responses of plants to stress. *BioScience* 41: 29-36.

Coolman RM, Hoyt GD (1993) Increasing sustainability by intercropping. *HortTechnology* 3: 309-312.

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. *Tropical Pest Management* 35: 143-145.

Hay-Roe MM, Meagher RL, Nagoshi RN, Newman Y (2016) Distributional patterns of fall armyworm parasitoids in a corn field and a pasture field in Florida. *Biological Control* 96: 46-56.

Hoballah ME, Degen T, Bergvinson D, Savidan A, Tamò C, Turlings TCJ (2004) Occurrence and direct control potential of parasitoids and predators of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) on maize in the subtropical lowlands of Mexico. *Forest Entomology* 6(1): 83-88.

Khan ZR, Midega CAO, Bruce TJA, Hooper AM, Pickett JA (2010) Exploiting phytochemicals for developing a 'push-pull' crop protection strategy for cereal farmers in Africa. *Journal of Experimental Botany* 61: 4185-4196.

Landis DA, Wratten SD, Gurr GM (2000) Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* 45(1): 175-201.

Liu X, Chen M, Collins HL, Onstad DW, Roush RT, Zhang Q, Earle ED, Shelton AM (2014) Natural enemies delay insect resistance to Bt Crops. *PLoS ONE* 9(3): e90366. doi:10.1371/journal.pone.0090366

Marino PC, Landis DA (1996) Effect of landscape structure on parasitoid diversity and parasitism in agroecosystems. *Ecological Applications* 6:276-284.

Martin EA, Seo B, Park CR, Reineking B, Steffan-Dewenter I (2016) Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields. *Ecological Applications* 26(2): 448-462.

Meagher RL, Nagoshi RN, Stuhl CS, Mitchell ER (2004) Larval development of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) on different cover crop plants. *Florida Entomologist* 87: 454-460.

Meagher RL, Nuessly GS, Nagoshi RN, Hay-Roe MM (2016) Parasitoids attacking fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in sweet corn habitats. *Biological Control* 95: 66-72.

Midega CAO, Pittchar J, Pickett JA, Hailu G, Khan ZR (2018) A climate-adapted push-pull system effectively controls fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), in maize in East Africa. *Crop Protection* 105: 10-15.

Morales H, Perfecto I, Ferguson B (2001) Traditional fertilization and its effect on corn insect populations in the Guatemalan highlands. *Agric. Ecosyst. Environ.* 84: 145-155.

Pichersky E, Gershenzon J (2002) The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense. *Current Opinion in Plant Biology* 5(3): 237-243.

- Pumariño L, Sileshi GW, Gripenberg S, Kaartinen R, Barrios E, Muchane MN, Midega C, Jonsson M (2015) Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology* 16: 573-582.
- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2011) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 273-303.
- Rivers A, Barbercheck M, Govaerts B, Verhulst N (2016) Conservation agriculture affects arthropod community composition in a rainfed maize-wheat system in central Mexico. *Applied Soil Ecology* 100: 81-90.
- Rossi CE *et al.* (1987) Influência de diferentes adubações em milho sobre *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecosistema* 12: 88-101. 1987.
- Stevenson PC, Kite GC, Lewis GP, Forest F, Nyirenda SP, Belmain SR, Sileshi GW, Veitch NC (2012) Distinct chemotypes of *Tephrosia vogelii* and implications for their use in pest control and soil enrichment. *Phytochemistry* 78: 135-146.
- Tillman GM, Schomberg H, Phatak S, Mullinix B, Lachnicht S, Timper P, Olson D (2004) Influence of cover crops on insect pests and predators in conservation tillage cotton. *Journal of Economic Entomology* 97: 1217-1232.
- Tscharntke, T, Karp, DS, Chaplin-Kramer, R, Batáry, P, DeClerck, F, Gratton, C Larsen, A (2016). When natural habitat fails to enhance biological pest control—Five hypotheses. *Biological Conservation*, 204, 449-458.
- Van den Berg J, Van Rensburg JBJ (1991) Infestation and injury levels of stem borers in relation to yield potential of grain sorghum. *South African Journal of Plant and Soil* 8: 127– 131.
- Veres A, Petit S, Conord C, Lavigne C (2013) Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 166: 110-117.
- Wyckhuys KAG, O'Neil RJ (2006) Population dynamics of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) and associated arthropod natural enemies in Honduran subsistence maize. *Crop Protection* 25: 1180–1190.
- Wyckhuys KAG, O'Neil RJ (2007) Influence of extra-field characteristics to abundance of key natural enemies of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) in subsistence maize production. *International Journal of Pest Management* 53: 89-99.
- Wyckhuys KA, O'Neil RJ (2010) Social and ecological facets of pest management in Honduran subsistence agriculture: implications for IPM extension and natural resource management. *Environment, Development and Sustainability* 12(3): 297-311.

Annexes

Annexe 1. Liste des participants à l'atelier de l'élaboration du guide pratique sur la lutte contre la chenille légionnaire d'automne en Afrique (du 16 au 17 septembre 2017 ; Entebbé, Ouganda).

Nom	Institution	Pays	Nom	Institution	Pays
1 Georg Goergen	IITA	Bénin	27 Ernst Neering	NPPO	Pays-Bas
2 Tchoromi Ghislain Tapa-Yotto	IITA	Bénin	28 Malick Ba	ICRISAT	Niger
3 Ana-Paula Mendes	USAID	Brésil	29 John Abah Obaje	NPPO	Nigéria
4 Ivan Cruz	EMBRAPA	Brésil	30 Johnnie van den Berg	North-West University	Afrique du Sud
5 Abdel Fattah Amer Mabrouk	AU-IAPSC	Cameroun	31 Abdullahi D. Khalif	FEWS NET	Sud Soudan
6 Dave Hodson	CIMMYT	Éthiopie	32 Felix Dzvurumi	FAO	Éthiopie
7 Felege Elias	DLCO-EA	Éthiopie	33 Francis Nkurunziza	Secours catholiques	Sud Soudan
8 Dietrich Stephan	Institut Julius-Kühn	Allemagne	34 Wilfred Mushobozi	Crop Bioscience Ltd.	Tanzanie
9 Jörg Wennmann	Institut Julius-Kühn	Allemagne	35 Komi Agboka	Université de Lomé	Togo
10 Stephan Winter	Institut Leibniz DSMZ	Allemagne	36 Ambrose Agona	NARO	Ouganda
11 Ebenezer Aboagye	NPPO	Ghana	37 Godfrey Asea	NARO	Ouganda
12 Allan Hruska	FAO	Italy	38 Anani Bruce	CIMMYT	Kenya
13 B.M. Prasanna	CIMMYT	Kenya	39 Mathew Abang	FAO	Ouganda
14 David Onyango	CABI	Kenya	40 Stephen Byantwale	Ministère de l'Agriculture, de l'Industrie animale et de la Pêches	Ouganda
15 Emily Kimathi	ICIPE	Kenya	41 Daniel McGrath	Université d'État de l'Oregon	Etats-Unis
16 Francis Ndeithi	Syngenta	Kenya	42 Joseph Huesing	USAID	Etats-Unis
17 Hugo De Groot	CIMMYT	Kenya	43 Paul Jepson	Université d'État de l'Oregon	Etats-Unis
18 Ivan Rwomushana	ICIPE	Kenya	44 Regina Eddy	USAID	Etats-Unis
19 Joseph Kibaki Miano	Bayer	Kenya	45 Muniappan Rangaswamy	Virginia Tech	Etats-Unis
20 Lilian Gichuru	AGRA	Kenya	46 Rob Meagher	USDA-ARS	Etats-Unis
21 Margaret Mulaa	CABI	Kenya	47 Robert Beiriger	Université de Floride	Etats-Unis
22 Muo Kasina	KALRO	Kenya	48 Yene Belayneh	USAID	Etats-Unis
23 Nicholas Davis	CIMMYT	Kenya	49 Isaiah Nthenga	Institut de recherche agricole de Zambie	Zambie
24 Tracy McCracken	UID	Kenya	50 Christian Thierfelder	CIMMYT	Zimbabwe
25 Vongai Kandiwa	CIMMYT	Kenya	51 Joyce Mulila-Mitti	FAO	Zimbabwe
26 Donald Kachigamba	NPPO	Malawi	52 Peter Chinwada	Université du Zimbabwe	Zimbabwe

Annexe 2. Liste des participants à l'atelier régional de formation et de sensibilisation sur la gestion du ravageur de la chenille légionnaire d'automne en Afrique australe (du 30 octobre au 1er novembre 2017 ; Harare, Zimbabwe).

Nom	Institution	Pays	Nom	Institution	Pays
1 Georg Goergen	IITA	Bénin	36 Regina Eddy	USAID	États-Unis
2 Kuate Sebua	MoA	Botswana	37 Sabeen Dhanani	USAID	États-Unis
3 Tamuka Magadzire	FEWS NET	Botswana	38 Rob Meagher	USDA-ARS	États-Unis
4 Ivan Rwomushana	CABI	Kenya	39 Simasiku Nyambe	Unité de gestion et de réduction des catastrophes	Zambie
5 Margaret Mulaa	CABI	Kenya	40 Anthony Chapoto	Institut Indaba de recherche sur la politique agricole	Zambie
6 B.M. Prasanna	CIMMYT	Kenya	41 Christabel Chengo-Chabwela	Institut Indaba de recherche sur la politique agricole	Zambie
7 Nicholas Davis	CIMMYT	Kenya	42 Shadreck Mwale	MoA	Zambie
8 Saliou Niassy	ICIPE	Kenya	43 Harry Ngoma	USAID	Zambie
9 David Wangila	Monsanto	Kenya	44 Gilson Chipabika	Institut zambien de recherche agricole	Zambie
10 Francis Ndeithi	Syngenta	Kenya	45 Tinomuonga Hove	ActionAid	Zimbabwe
11 Anderson Chikomola	MoA, Développement hydraulique & irrigation	Malawi	46 Rob Fisher	AgDevCo	Zimbabwe
12 George Lungu	MoA, Développement hydraulique & irrigation	Malawi	47 Augustin Musomera	CARE	Zimbabwe
13 Tonny Harris H. Maulana	MoA, Développement hydraulique & irrigation	Malawi	48 Tafadzwa Moliba	Christian Aid	Zimbabwe
14 Samuel Njoroge	ICRISAT	Malawi	49 Christian Thierfelder	CIMMYT	Zimbabwe
15 George Villili	USAID Ag Div Project	Malawi	50 Cosmos Magorokosho	CIMMYT	Zimbabwe
16 Fenton Sands	USAID Malawi	Malawi	51 Taswell Chivere	CNFA	Zimbabwe
17 Martin Banda	USAID Malawi	Malawi	52 Khumalo Ncomulwazi	DCA	Zimbabwe
18 Aderito Lazaro	Dépt. de protection végétale, MoA	Mozambique	53 Fortune Sangweni	DR & SS	Zimbabwe
19 Antonia Vaz Tombolane	Dept. of Plant Protection, MoA	Mozambique	54 Josephine Ngorima	DR & SS	Zimbabwe
20 Domingos Cugala	Eduardo Mondlane University	Mozambique	55 Providence Mugari	DR & SS	Zimbabwe
21 Moses Muchayaya	Empreza de Comercializacao Agricola Lda	Mozambique	56 Richard Rwafa	DR & SS	Zimbabwe
22 Alfredo Novela	Programme alimentaire mondial	Mozambique	57 Tafadzwa Makanza	DR & SS	Zimbabwe
23 Ravi Moustache	Agence nationale de biosécurité	Seychelles	58 Kudzai Mutowo	Agence de gestion environnementale	Zimbabwe
24 Jan Van Vuuren	Bayer	South Africa	59 Mark Benzon	Fintrac	Zimbabwe
25 Bellah Mpofo	Feed the Future Southern Africa Seed	Afrique du Sud	60 Meynard Chirima	Fintrac	Zimbabwe
26 Patricia Rwasoka-Masanganise	USAID Afrique australe	Afrique du Sud	61 Conrad Murendo	ICRISAT	Zimbabwe
27 Takele Tassew	USAID Afrique australe	Afrique du Sud	62 Kennedy Mukonyora	IRC	Zimbabwe
28 Tomas Rojas	USAID Afrique australe	Afrique du Sud	63 Prisca Myagweta	LEAD Trust	Zimbabwe
29 Jeromy McKim	USDA APHIS Afrique australe	Afrique du Sud	64 Scarlet Chamambo	Plan International	Zimbabwe
30 Marius Boshoff	Villa Crop Protection	Afrique du Sud	65 Peter Chinwada	Université du Zimbabwe	Zimbabwe
31 Barry Pittendrigh	Université d'État du Michigan	États-Unis	66 Adam Silagyi	USAID Zimbabwe	Zimbabwe
32 Julia Bello-Bravo	Université d'État du Michigan	États-Unis	67 Herold Ngwenya	WHH	Zimbabwe
33 Dan McGrath	Université d'État de l'Oregon	États-Unis	68 Abraham Muzulu	Vision du monde	Zimbabwe
34 Paul Jepson	Université d'État de l'Oregon	États-Unis	69 Lilian Zheke	Entreprise de Vision Enterprise	Zimbabwe
35 Joseph Huesing	USAID	États-Unis			

Annexe 3. Liste des participants à l'atelier régional de formation et de sensibilisation sur la gestion du ravageur de la chenille légionnaire d'automne en Afrique de l'Est (du 13 au 15 novembre 2017 ; Capital Hotel, Addis Abeba, Éthiopie).

Nom	Institution	Pays	Nom	Institution	Pays
1 Georg Goergen	IITA	Benin	34 David Wangila	Monsanto	Kenya
2 Alexis Mpaweninmana	Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU)	Burundi	35 Daniel Omondi	One Acre Fund	Kenya
3 Eustache Cimpaye	Département nationale de la protection des végétaux	Burundi	36 Francis Ndeithi	Syngenta	Kenya
4 Longin Nzeyimana	Réseau Burundi 2000	Burundi	37 Kennedy Onchuru	USAID	Kenya
5 Leif Davenport	USAID/Burundi	Burundi	38 Adam Norikane	USAID Afrique de l'Est	Kenya
6 Adefris Teklewold	CIMMYT	Éthiopie	39 Samson Okumu	USAID/Kenya	Kenya
7 Akililework Bekele	CIMMYT	Éthiopie	40 Landouard Semukera	Activité FIF Hinga Weze	Rwanda
8 Bekele Abeyo	CIMMYT	Éthiopie	41 Nicolas Uwitonze	Activité FIF Hinga Weze	Rwanda
9 Dagne Wegary	CIMMYT	Éthiopie	42 Cecile Kagoyire	Office rwandais de l'agriculture	Rwanda
10 David Hodson	CIMMYT	Éthiopie	43 Leon Hakizamungu	Office rwandais de l'agriculture	Rwanda
11 Birhanu Sisay	EIAR	Éthiopie	44 Abdulhakim Ahmed Guled	GEEL	Somalie
12 Eshetu Derso	EIAR	Éthiopie	45 Mohamed Abdillahi	USAID Somalie	Somalie
13 Girma Demissie	EIAR	Éthiopie	46 Girma Deressa Yadete	Services de secours catholique	Soudan du Sud
14 Yared Gebremeden	Agence de presse éthiopienne	Éthiopie	47 Kudzayi Mazumba	Programme alimentaire mondial	Soudan du Sud
15 Bateno Kabeto	FAO	Éthiopie	48 John Waswa	Vision du monde	Soudan du Sud
16 Amenti Chali	Fintrac	Éthiopie	49 Ayoub Francis Nchimbi	Ministère de l'Agriculture-Service de la protection des végétaux	Tanzanie
17 Habtamu Tsegaye	Fintrac, FIF Activité de la chaîne de valeur en Éthiopie	Éthiopie	50 Juma Mwinyimkuu	Ministère de l'Agriculture-Service de la protection des végétaux	Tanzanie
18 Tadele Tefera	ICPE	Éthiopie	51 Maneno Chidege	MoA-Institut de recherche tropicale sur les pesticides	Tanzanie
19 Abraham Mulatu	Ministère de l'Agriculture et des Ressources naturelles	Éthiopie	52 Tracy McCracken	USAID Afrique de l'Est	Tanzanie
20 Heyru Hussein	Ministère de l'Agriculture et des Ressources naturelles	Éthiopie	53 Filbert Mzee	Activité USAID/NAFAKA	Tanzanie
21 Woldehawariat Assefa	Ministère de l'Agriculture et des Ressources naturelles	Éthiopie	54 Elizabeth Maeda	USAID/Tanzanie	Tanzanie
22 Jemal Abdurahman	Monsanto	Éthiopie	55 Léna Durocher-Granger	CABI	Royaume-Uni
23 Faith Bartz Tarr	USAID	Éthiopie	56 Barry Pittendrigh	Université d'État du Michigan	États-Unis
24 Getinet Ameha	USAID/Éthiopie	Éthiopie	57 Julia Bello-Bravo	Université d'État du Michigan	États-Unis
25 Josephine Olual	Africa Lead	Kenya	58 Paul Jepson	Université d'État de l'Oregon	États-Unis
26 Thomas Wallace	Africa Lead	Kenya	59 Joseph Huesing	USAID	États-Unis
27 Joseph Kibaki Miano	Bayer	Kenya	60 Regina Eddy	USAID BFS	États-Unis
28 B.M. Prasanna	CIMMYT	Kenya	61 Christian Thierfelder	CIMMYT	Zimbabwe
29 Nick Davis	CIMMYT	Kenya	62 Dan McGrath	Université d'État de l'Oregon	Zimbabwe
30 Zachary Kinyua	KALRO	Kenya	63 Peter Chinwada	Université du Zimbabwe	Zimbabwe
31 George Odingo	KAVES	Kenya	62 Dan McGrath	Université d'État de l'Oregon	Zimbabwe
32 Hellen Heya	KEPHIS	Kenya	63 Peter Chinwada	Université du Zimbabwe	Zimbabwe
33 Josephine Simiyu Wetungu	Ministère de l'Agriculture	Kenya			



en collaboration avec les partenaires internationaux
et nationaux en recherche et en développement

Pour plus d'informations, veuillez contacter:

Siège de CIMMYT
Apdo. Postal 6-641 CDMX, México 06600
Email: cimmyt@cgiar.org
www.cimmyt.org