



Les arthropodes du cotonnier

Diversité et modalités
de gestion des ravageurs

Les arthropodes du cotonnier

Diversité et modalités de gestion
des ravageurs

Pierre Jean Silvie et Bernard Papierok

Éditions Quæ

Collection *Savoir-faire*

L'agriculture de conservation des sols
Stéphane Cordeau, Pierre-Alain Maron,
Jean-Pierre Sarthou, Bruno Chauvel, coord.
2024, 420 p.

Pesticides en viticulture
Usages, impacts et transition agroécologique
Francis Macary, coord.
2023, 232 p.

Crises sanitaires en agriculture
Les espèces invasives sous surveillance
Christian Lannou, Jean-Yves Rasplus, Samuel Soubeyrand,
Mathieu Gautier, Jean-Pierre Rossi, coord.
2023, 326 p.

Pour citer cet ouvrage :

Silvie P.J., Papierok B., 2025. *Les arthropodes du cotonnier. Diversité et modalités de gestion des ravageurs*, Versailles, éditions Quæ, 190 p.

En couverture (de gauche à droite) : sarclage d'un champ de cotonniers à l'aide d'une paire de bœufs (Paraguay); chenille de *Spodoptera frugiperda* dans une capsule de cotonnier (Brésil, État du Mato Grosso); récolte mécanique du coton-graine au moyen d'une machine *cotton picker* (Brésil, État du Mato Grosso).

Crédit photo : en couverture et dans l'ouvrage, sauf mention contraire, les photographies sont de Pierre Jean Silvie.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com – www.quae-open.com

© éditions Quæ, 2025
ISBN papier : 978-2-7592-4000-5
ISBN PDF : 978-2-7592-4001-2
ISBN ePub : 978-2-7592-4002-9
ISSN : 1952-1251

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Remerciements | 5 |
| Introduction | 7 |

Partie 1

Diversité des arthropodes du cotonnier, dégâts et pertes de production occasionnés

| | |
|--|----|
| Chapitre 1. Le cotonnier et sa culture | 12 |
| La plante : aspects botaniques..... | 12 |
| La diversité des modalités de culture du cotonnier..... | 13 |
| Chapitre 2. Les problèmes phytosanitaires liés aux arthropodes | 19 |
| La diversité des dégâts causés au cotonnier..... | 20 |
| La diversité des arthropodes phytophages du cotonnier..... | 42 |
| Chapitre 3. La régulation naturelle par les arthropodes et par les micro-organismes | 52 |
| Les ennemis naturels par groupes fonctionnels..... | 52 |
| Importance globale du complexe d'ennemis naturels..... | 70 |
| Chapitre 4. Les pertes de production liées à la diversité des arthropodes | 71 |
| Les pertes quantitatives..... | 71 |
| Les pertes qualitatives..... | 72 |

Partie 2

Stratégies et pratiques de gestion des ravageurs du cotonnier

| | |
|--|-----|
| Chapitre 5. Évolution des stratégies en protection des végétaux | 77 |
| Lutte intégrée et gestion à large échelle géographique..... | 78 |
| De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable..... | 82 |
| Lutte biologique et biocontrôle..... | 83 |
| Agroécologie et protection agroécologique des cultures..... | 84 |
| Chapitre 6. Diversité des pratiques de protection du cotonnier | 86 |
| Cas de la culture naturelle du cotonnier..... | 87 |
| Cas de la culture de coton biologique certifié..... | 87 |
| Cas de la culture cotonnière dite conventionnelle..... | 91 |
| Ambiguïtés inhérentes à l'utilisation des insecticides..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre 7. Vers une réduction de l'emploi des insecticides de synthèse en Afrique subsaharienne | 110 |
| Programme de protection dose-cadence..... | 110 |
| Programmes de protection avec seuils..... | 111 |
| Chapitre 8. Autres méthodes adoptées pour la protection du cotonnier | 116 |
| Adoption partielle de la lutte biologique ou de la régulation naturelle..... | 116 |
| Emploi de phéromones..... | 118 |
| Associations de cultures et agroforesterie..... | 119 |
| Les seuils en cultures mécanisées..... | 129 |
| Chapitre 9. Mise en pratique des stratégies : difficultés et défis à relever | 131 |
| Difficultés de définition ou d'application des seuils..... | 131 |
| Difficultés liées à l'adoption des cotonniers Bt..... | 134 |
| Difficultés de mise en œuvre des méthodes de lutte..... | 136 |
| Chapitre 10. Conclusions et perspectives | 145 |
| Diversité taxinomique, biologie et écologie des ravageurs..... | 145 |
| Développer de nouvelles connaissances sur les interactions ravageurs-cotonnier..... | 148 |
| Implication des acteurs de la chaîne de valeur..... | 155 |
| Références bibliographiques | 158 |

Remerciements

Les auteurs remercient Laurence Rodriguez (Cirad) de son appui technique pour l'iconographie; Myren Rouly et Philippe de Mortillet (Cirad), Jean-Claude Streito (INRAE) et Elsa Ballini (SupAgro) pour l'appui bibliographique; Martine Duportal (Cirad) pour la réalisation des graphes (figures 90 et 98); les auteurs nous ayant aimablement autorisés à utiliser leurs photographies : Gazi Golam Mortuza et Fakhre Alam Ibne Tabib (Bangladesh), Guilherme Rolim et Jorge Bras Torres (Brésil), Ren Jinghe, Xu Min et Lizhen Zhang (Chine), Jean-Charles Sigrist (Ivoire Coton) pour les contacts dans le monde du coton qu'il nous a opportunément recommandés et, enfin, les relecteurs anonymes.

Nos remerciements s'adressent également aux institutions qui ont contribué financièrement à la publication de cet ouvrage (ordre alphabétique) : AFCOT, Bancella Ltd, Cirad (Filière coton/unité Aïda), CropLife, ECOM, Fondation Paul Reinhart, ICRA, Ivoire Coton, Savana, SOLEVO, UPL Corporation Ltd.



Introduction

La majorité des fibres naturelles utilisées aujourd'hui pour la confection de vêtements est produite par le cotonnier.

La culture de cette plante dans le monde, toutes modalités confondues, couvrait 32,64 millions d'hectares en 2021-2022¹. Aux États-Unis d'Amérique, en Australie, au Brésil, elle est réalisée par de grandes exploitations, d'une manière intensive et industrielle, mais son importance économique est également indéniable pour des millions de petits agriculteurs², en particulier en Asie et en Afrique.

Parallèlement à la compétition avec les mauvaises herbes, le cotonnier est connu pour les pertes qu'il subit au cours de son développement du fait de l'action de différents agresseurs : essentiellement des bactéries, des champignons, des virus, des nématodes phytopathogènes et surtout, des arthropodes, insectes et acariens. Ce dernier groupe d'agresseurs est d'autant plus important que les prélèvements et les dégâts causés peuvent affecter toutes les parties de la plante. Il représente en fait la plus forte contrainte de production, à côté des mauvaises herbes en début de cycle dans le cas où les précipitations sont abondantes.

La protection des cultures de cottonniers au moyen de produits phytosanitaires s'est donc rapidement avérée indispensable pour améliorer la productivité et obtenir des rendements plus élevés. Cette plante est ainsi devenue, à l'échelle mondiale, l'une de celles recevant le plus grand nombre d'applications d'insecticides³ organiques de synthèse ; à titre de comparaison, elle en reçoit autant que les cultures légumières et fruitières (De Bon *et al.*, 2014 ; Ferron, 2016), mais moins que le soja (Kranthi, 2024).

En Afrique, l'adoption à grande échelle des insecticides de synthèse n'était pourtant pas initialement envisagée. Ainsi, Le Gall, entomologiste à l'Institut de recherches du coton et des textiles exotiques (IRCT), institut créé après la Seconde Guerre mondiale, notait en 1951, dans le rapport annuel du service entomologique de la station de Tikem, au Tchad : « Nous ne pensons pas que les procédés de lutte chimique, coûteux et d'application délicate, puissent passer un jour dans la pratique courante au Tchad ». De ce fait, ainsi que le souligne Gahukar (1991), les premiers travaux des entomologistes de l'IRCT ont davantage porté sur la

¹ <https://www.cottonportal.org/cotton/fr/cotton-content/cotton-statistics>.

² Afin d'alléger le texte, l'usage du masculin pluriel désigne à la fois les deux genres, masculin et féminin.

³ Dans cet ouvrage, sauf mention, le terme « insecticide » est employé en incluant également les molécules acaricides, à action plus spécifique sur les acariens phytophages.

biologie et sur l'écologie des principaux ravageurs du cotonnier en Afrique francophone. Un exemple en est donné avec les travaux de Galichet (1964 ; 1965) sur le lépidoptère *Diparopsis watersi* Rothschild.

Les années 1970 ont vu les investigations à dominante écologique se ralentir du fait de l'adoption et de la diffusion rapide de molécules s'avérant très efficaces, les pyréthrinoides de synthèse. À partir des années 1980, le contexte changea, avec une mise en cause des applications répétées de produits phytosanitaires et de leurs effets négatifs. Le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), constitué de la réunion des anciens instituts de recherche tropicale, dont l'IRCT, s'est alors engagé dans un ensemble de travaux orientés vers la mise au point de pratiques de protection plus respectueuses de l'environnement avec, comme « mots d'ordre », d'une part, diminuer les quantités de matières actives synthétiques utilisées et, d'autre part, veiller à combiner les différentes méthodes disponibles pour la gestion des populations d'un ravageur. De fait, l'objectif visé correspondait aux préoccupations qui se manifestaient alors au niveau mondial et qui s'étaient notamment concrétisées par le développement du concept d'*integrated control* (Stern *et al.*, 1959), prenant par la suite le nom d'*integrated pest management* (IPM), une stratégie fondée sur la définition et sur l'estimation de seuils (seuil de dégâts, seuil économique d'intervention) devant être atteints avant toute action de contrôle⁴. À l'aube des années 2000, la démarche adoptée en Afrique subsaharienne a abouti à la mise en pratique d'une lutte chimique raisonnée et ciblée (Silvie *et al.*, 2001 ; Kpadé et Mensah, 2013).

S'inscrivant dans cette démarche, le présent ouvrage est consacré aux arthropodes du cotonnier. Leur description et leur énumération soit à un niveau mondial, soit à un niveau régional, ont fait à ce jour l'objet de très nombreuses publications de nature diverse. Selon les cas, il s'agit en effet d'ouvrages proprement dits (Vayssièrre et Mimeur, 1926 ; Willcocks et Bahgat, 1937 ; Brixhe, 1949 et 1961 ; Pearsons et Maxwell-Darling, 1958 ; Ripper et George, 1965 ; Matthews, 1989 ; Cauquil, 1993 ; Matthews et Tunstall, 1994 ; King *et al.*, 1996 ; Vaissayre et Cauquil, 2000 ; Bélot *et al.*, 2019), de chapitres d'ouvrage (Leight *et al.*, 1996 ; Renou et Brévault, 2016), d'articles dans des revues (Delattre, 1958) ou de manuels ou guides édités par les instituts techniques (Kuklinski, 2000 ; Silvie *et al.*, 2007 ; Silvie *et al.*, 2013b). Signalons à ce sujet les nombreuses synthèses parues dans la collection série « Les déprédateurs du cotonnier en Afrique tropicale et dans le reste du monde » éditée par l'IRCT.

Certaines des contributions citées contiennent des clés d'identification des bioagresseurs en fonction des principaux dégâts qu'ils occasionnent (Brixhe, 1949 et 1961 ; Delattre, 1958), cependant que l'iconographie importante de publications plus récentes constitue une aide à l'identification rapide (Matthews, 1989 ; Vaissayre et Cauquil, 2000 ; Bélot *et al.*, 2019). Notons toutefois que l'année de parution de l'ouvrage de Matthews (1989), deux autres ouvrages, non illustrés,

⁴ Notons qu'avec cette définition les démarches d'anticipation ou de prévention des attaques, comme le traitement des semences, n'entrent pas complètement dans le cadre de l'IPM.

étaient édités respectivement par M.B. Green et D.J. de B. Lyon et R.E. Frisbie, K.M. El-Zik et L.T. Wilson. Notons également l'originalité de l'ouvrage de G. Matthews et J.P. Tunstall (1994), qui, traitant de la situation des ravageurs du cotonnier sur le plan mondial, Afrique comprise, comporte quelques illustrations de leurs ennemis naturels. Ces derniers ont en outre fait l'objet de publications spécifiques (Van den Berg et Cock, 1993; Harper et Carner, 1996; López *et al.*, 1996; Michel et Bournier, 1997; Silvie *et al.*, 2009 et 2023a).

Plus récemment, le livre sur le cotonnier coordonné par Crétenet et Gourlot (2016), centré sur l'Afrique francophone, comporte un chapitre, par Renou et Brévault, détaillant la biologie et les pertes relatives liées aux divers ravageurs en Afrique, ainsi que les maladies autres que celles qui sont transmises. Il a, en outre, l'avantage de proposer, en plus des photographies des principaux ravageurs du cotonnier en Afrique subsaharienne, des illustrations en couleurs des symptômes de carences minérales à ne pas confondre avec des dégâts dus aux insectes ou aux maladies transmises par ces derniers.

À ce jour, le dernier ouvrage sur la question est celui de Matthews et Miller (2021). Il traite de la situation des ravageurs du cotonnier à l'échelle mondiale, avec des chapitres rédigés par pays ou par régions (pays le long du Nil, par exemple). À côté d'un rappel de l'historique de la culture, des détails et des illustrations sont souvent apportés sur le matériel utilisé pour les applications d'insecticides, notamment chez les petits producteurs, un aspect technique indubitablement lié au domaine de prédilection de Graham Matthews (Matthews, 1990). Dans le chapitre sur l'Afrique de l'Ouest (Ochou *et al.*, 2021), le rappel historique est présenté par pays, du Sénégal au Tchad. L'organisation des filières et la protection phytosanitaire sont détaillées dans le cas de la Côte d'Ivoire, du Cameroun, du Mali, du Bénin et du Togo, ainsi que dans celui de deux pays anglophones, le Ghana et le Nigeria.

Dans un tel contexte éditorial, le parti pris a été ici de présenter une nouvelle synthèse sur une double base :

- Souligner la diversité des situations rencontrées par les auteurs principalement en Afrique subsaharienne francophone et en Amérique du Sud, en les comparant, que ce soit en matière de modalités de cultures, de ravageurs et de leurs ennemis naturels. L'iconographie, en très grande partie originale, donne la priorité aux photographies d'espèces rarement illustrées et à celles de dégâts ou de scènes insolites. Ces aspects font l'objet de la première partie de l'ouvrage.

- Exposer, dans la seconde partie, les concepts ou stratégies successifs de contrôle des arthropodes, rappeler les travaux réalisés en Afrique subsaharienne francophone, en discutant à chaque fois des difficultés rencontrées dans la mise en application de stratégies visant à réduire l'usage des insecticides, puis décrire des pratiques, expérimentales ou non, employées en dehors des continents africains et américains. Cette partie se conclura par une analyse des perspectives offertes par une approche de gestion des ravageurs qui tient compte de l'ensemble des composantes de l'agroécosystème.

Partie 1

Diversité des arthropodes
du cotonnier, dégâts et pertes
de production occasionnés

Chapitre 1

Le cotonnier et sa culture

La plante : aspects botaniques

Le cotonnier cultivé se rapporte à quatre espèces du genre *Gossypium*, de la famille des Malvaceae : *Gossypium arboreum* (L.), *G. herbaceum* (L.), *G. barbadense* (L.), et la plus importante sur le plan commercial, *G. hirsutum* (L.).

D'une manière intéressante, d'autres espèces appartenant à cette famille sont attaquées par certains ravageurs du cotonnier. Il peut s'agir soit de plantes non cultivées, soit de plantes cultivées comme le gombo (*Abelmoschus* [= *Hibiscus*] *esculentus* [L.], Moench) ou, plus anciennement, le jute du Congo, ou jute africain, *Urena lobata* (L.), en Afrique subsaharienne.

Le cotonnier est cultivé principalement pour ses fibres, poils végétaux constitués de cellulose présents sur les graines. La plante fournit également des sous-produits importants, comme de l'huile et des tourteaux qui résultent de la pression des graines (Bachelier et Gourlot, 2021). Le linter, constitué de fibres courtes, est parfois récupéré pour la confection de matelas, de coussins. Le lecteur intéressé trouvera chez Orsenna (2006) un descriptif littéraire des divers usages du cotonnier. Plus généralement, le cotonnier a marqué l'humanité dans les arts, notamment à travers le blues, musique née dans les plantations du sud des États-Unis d'Amérique⁵.

Le cotonnier présente la particularité de contenir un composé toxique, le gossypol, produit dans de nombreuses glandes bien visibles sur les diverses parties de la plante (boutons floraux et bractées, tiges, capsules, feuilles) (figure 1), et lui conférant une défense naturelle contre de nombreux insectes. Ce composé est également toxique pour les vertébrés à estomac simple (monogastriques), comme l'homme. Des variétés sans glandes (dites *glandless*) ont été créées dans les pays où la plante est bien adaptée et résistante à la sécheresse (Lançon, 1996). La plante peut ainsi fournir une ressource alimentaire supplémentaire sous la forme de farine transformée en gâteaux par exemple (Marquié, 1994).

Ces variétés sont davantage sensibles à l'attaque de certains coléoptères (voir section « Dégâts directs visibles de l'extérieur », chapitre 2). Cependant, les travaux de sélection menés (Sunilkumar *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2010; Rathore *et al.*, 2012) ont permis d'obtenir aux États-Unis des variétés présentant des glandes à gossypol dans tous les tissus, mais en très petites quantités dans les graines

⁵ Dans la suite du texte, le vocable « États-Unis » sera systématiquement utilisé pour désigner les États-Unis d'Amérique.

(Hagenbucher *et al.*, 2019 ; Rathore *et al.*, 2020), ce qui représente un fort intérêt pour l'alimentation humaine dans les régions où des problèmes de sécurité alimentaire sont récurrents.

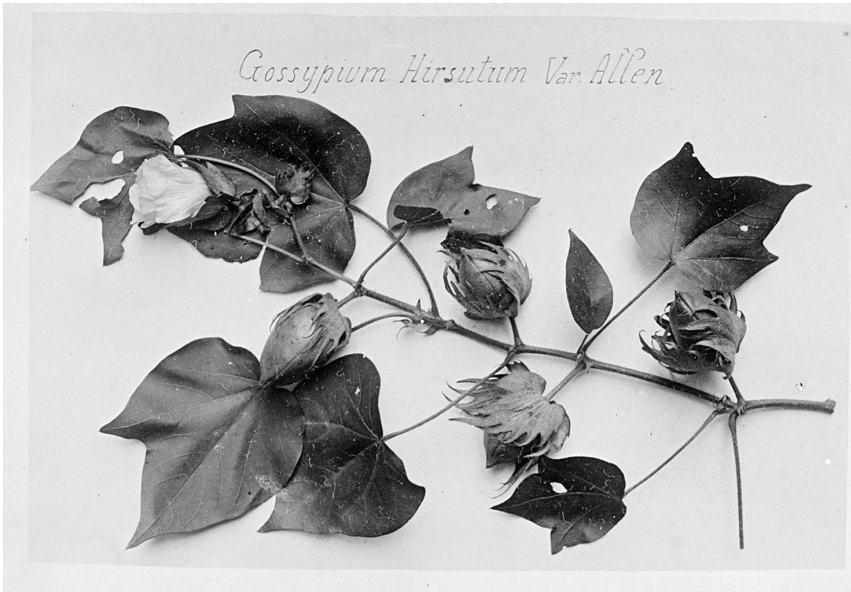


Figure 1. Branche de cotonnier *Gossypium hirsutum* variété Allen montrant la présence simultanée des différents organes (fleurs, capsules vertes). Source : D.R., @Fonds historique, Cirad.

La diversité des modalités de culture du cotonnier

La culture du cotonnier est pratiquée dans un certain nombre de pays de la ceinture tropicale (figure 2). En dehors de cette ceinture, la plante est cultivée en Australie, en Espagne, en Grèce, en Chine, aux États-Unis, en Ouzbékistan. Les besoins en température de la plante pour l'accomplissement d'un cycle de végétation sont de 1 500 degrés-jours, la température de base étant de 13 °C (Crétenet et Gourlot, 2016). De fait, l'évolution du climat pourrait exercer une influence sur la répartition de la culture du cotonnier et, en conséquence, sur celle de ses ravageurs.

L'alimentation hydrique annuelle nécessaire au cotonnier est de 600 à 1 200 mm, mais des cultures recevant 300 mm sont pratiquées dans le Nordeste brésilien (sertão de l'État de Paraíba, par exemple). Selon les situations, la plante reçoit pour son développement les précipitations naturelles ou ses besoins sont pourvus par irrigation. La contrainte hydrique a une incidence sur la longueur du cycle cultural, mais également sur la qualité de la fibre ainsi que sur la présence de maladies et de ravageurs. Au niveau mondial, plus de 50 % des superficies cultivées sont irriguées, ce qui représente une forte pression sur la ressource naturelle essentielle qu'est l'eau. Ce n'est pas le cas en Afrique subsaharienne et dans les pays d'autres continents, où la culture est conduite sous régime pluvial.

S'ajoutant au type d'approvisionnement en eau, la diversité des modalités de culture du cotonnier dans le monde s'explique par d'autres contraintes : la fertilité du sol, les surfaces disponibles ainsi que l'énergie mise à disposition sous la forme d'intrants divers et de force de travail. Traditionnellement, au Pérou par exemple, la plante était cultivée sans aucun intrant (fertilisant ou produit phytosanitaire), et aujourd'hui encore, la culture de coton biologique certifiée n'autorise aucun produit chimique de synthèse. Elle représente un marché dit « de niche ».

De très nombreuses variétés de cotonnier existent sur le marché. Elles peuvent présenter un cycle cultural de durée variable, en relation avec la pluviométrie, ainsi que des différences dans la date d'ouverture de la première capsule mûre (qui peut varier de 81 à 187 jours après le semis avec les variétés de *G. hirsutum* présentes dans la collection de cotonniers du Cirad).

Il est à noter que le cotonnier est une plante pérenne, mais le plus souvent semée et récoltée annuellement. D'une manière intéressante, cette nature pérenne peut être mise à profit dans la pratique culturale. Deux cas particuliers de culture méritent ainsi d'être cités, qui se rencontrent respectivement au nord du Paraguay (région du Chaco) et dans le nord-est du Brésil, où les conditions pluviométriques sont très variables d'une année à l'autre.

Les communautés mennonites vivant dans le Chaco paraguayen peuvent ainsi laisser passer volontairement la période de récolte lorsqu'un premier cycle de production a échoué du fait de conditions de sécheresse trop importantes. Les plants laissés au champ produiront lors d'un second cycle. Dans le Nordeste brésilien, les agriculteurs pratiquaient de la manière suivante avec la variété *marie-galante* de l'espèce *G. hirsutum* : les plants étaient conservés au champ durant une période qui pouvait couvrir trois années consécutives, cependant qu'une technique de recépage maintenait le système racinaire dans le sol et accélérât la reprise l'année suivant la première implantation. Des niveaux de production variable étaient ainsi obtenus chaque année. Cette pratique a eu une incidence sur les ravageurs présents tels que l'anthonome du cotonnier, charançon qui pouvait ainsi se maintenir et se multiplier d'une année à la suivante, une situation qui a entraîné l'arrêt de la culture du cotonnier. Récemment, cette culture a été relancée grâce notamment à des ONG, sur la base de pratiques différentes (culture annuelle avec des associations avec des plantes répulsives, par exemple).

À l'échelle mondiale, la disponibilité en surfaces cultivables est fortement variable par producteur. Il est ainsi possible d'établir une typologie des exploitations à partir de ce paramètre : « petits agriculteurs » ayant de 0,25 à 1 ou 2 ha, grandes exploitations de type fermes (plus de 50 ha à plusieurs milliers d'hectares), situations intermédiaires (exploitations de 10 à 50 ha).

Dans le cas des « petits agriculteurs », la taille de la surface cultivée en cotonnier est conditionnée par de nombreux facteurs : disponibilité en terre (droit au foncier), morcellement éventuel d'un lopin de terre en fonction de la composition

familiale (legs aux enfants) ou de la part attribuée aux cultures vivrières (sécurité alimentaire), possibilité de réaliser ou non une rotation ou une succession de cultures lorsque ce principe agronomique est souhaité, possibilité d'accès au crédit permettant de disposer d'intrants agricoles ou d'outils, ou de payer des services lorsque la main-d'œuvre familiale fait défaut (semences, désherbage, sarclage, récolte), notamment lorsque la migration des jeunes en direction des centres urbains est importante. La disponibilité en force de travail intervient donc de manière significative.

Le cotonnier peut être cultivé sur des parcelles de très petite taille. En Chine, dans la vallée du fleuve Jaune où l'unité élémentaire est le *mu* (1/15 d'hectare), il n'est pas rare, afin de profiter du moindre espace libre, d'observer quelques lignes de cotonniers cultivés en bordure de route, même à proximité des grands centres urbains (figure 3).

Les situations intermédiaires (exploitations de 10 à 50 ha) se rencontrent lorsque l'exploitant possède un petit tracteur. Il en est de même pour ceux disposant soit d'une aide de l'État ou d'une région au travers de projets de développement, soit des services d'une collectivité locale pour la réalisation de certains travaux de préparation (mécanisée) du sol, comme c'est le cas par exemple au Brésil, dans l'État du Mato Grosso do Sul, avec la coopérative de Navirai.

Avec les grandes exploitations, il s'agit de véritables entreprises agricoles qui ont leurs particularités et leurs nécessités en matière de culture cotonnière. Ainsi, une approche particulière relative à l'architecture de la plante est recherchée de manière à faciliter la récolte mécanique. De même, l'usage de variétés non pileuses au niveau des feuilles est privilégié, afin d'éviter une baisse de la qualité de la récolte par le dépôt de débris végétaux sur les fibres. La technique du semis direct dans un couvert végétal peut être pratiquée, comme c'est le cas au Brésil. Cette technique, employée pour la culture du soja ou du cotonnier (figure 4), nécessite la mise en place préalable d'un couvert végétal à base d'espèces de céréales, de légumineuses, voire d'un mélange des deux. Les études entreprises ont montré l'intérêt de ce couvert pour améliorer la qualité biologique des sols et la richesse spécifique (Verhulst *et al.*, 2010).

En définitive, on côtoie à l'échelle de la planète une grande diversité de modalités de culture du cotonnier ; une diversité qui va de la conduite en agriculture familiale sur de très petites superficies (0,5 ha ou moins), comme c'est majoritairement le cas en Afrique subsaharienne ou au Paraguay, à la culture industrielle menée en conditions hydriques naturelles (États-Unis, Brésil) (voir les photos de couverture et figures 5 à 7) ou avec des pratiques d'irrigation (États-Unis, Australie). Les cultures à petite échelle ou, plus rarement, à grande échelle sont également rencontrées dans la production de coton biologique (voir section « De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable », chapitre 5).

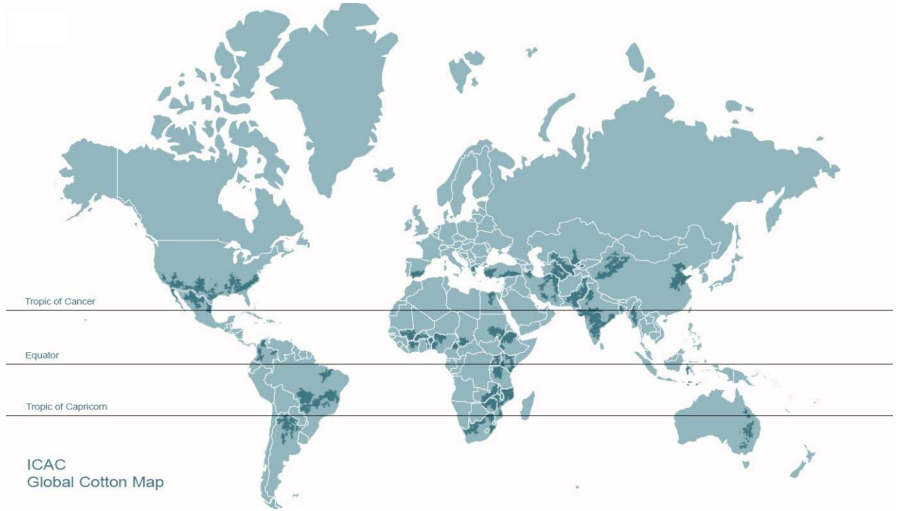


Figure 2. Répartition géographique mondiale (aires bleu foncé) de la production cotonnière
Source : Kranthi KR, ICAC⁶, Cotton Data Book, 2023.



Figure 3. Cotonniers cultivés en bord de route en Chine (ville de Anyang, province du Henan, 2015)

⁶ ICAC : International Cotton Advisory Committee.



Figure 4. Levée de cotonniers semés sous une couverture végétale (a) desséchée d'avoine (Brésil, État du Paraná, Palotina, décembre 2005), (b) de millet (Brésil, État du Mato Grosso, Campo Verde, fazenda Mourão, avril 2006)



Figure 5. Culture de cotonniers selon deux modalités d'espacement entre lignes (Brésil, Mato Grosso, mars 2009)



Figure 6. Récolte mécanique du coton-graine avec la machine *stripper* dans le cas de semis à haute densité (rangs serrés) (Brésil, Mato Grosso, octobre 2009)



Figure 7. Stockage au champ du coton-graine récolté sous forme de rouleaux protégés par une bâche plastique (Brésil, Mato Grosso, mars 2023). Crédit photo : Jean-Louis Bélot

Chapitre 2

Les problèmes phytosanitaires liés aux arthropodes

Les nombreux agresseurs du cotonnier ont une importance extrêmement variable, soulignée en Afrique centrale dès 1949 par Brixhe et illustrée par des schémas et des photographies dans ses tableaux de détermination (Brixhe, 1949 et 1961). La plante peut être attaquée, de façon occasionnelle, par des gastéropodes (figure 8). Les rats apprécient particulièrement les capsules des variétés sans glandes à gossypol. Dans certaines régions d'Afrique où la culture est conduite à proximité de réserves de faune sauvage, comme au nord du Togo par exemple, des dégâts dus au piétinement des éléphants peuvent être observés, ou encore des singes peuvent être amenés à s'alimenter de l'intérieur des capsules vertes. Ces altérations demeurent cependant anecdotiques.

De fait, l'essentiel des dégâts subis par le cotonnier est occasionné par des nématodes, par des maladies liées à des virus (souvent inoculés par des arthropodes piqueurs), à des champignons (fusariose signalée comme reliée à l'attaque de nématodes) ou à des bactéries, et par des arthropodes, insectes et acariens. Les nématodes phytopathogènes peuvent affecter les racines ou même la partie aérienne, comme dans le cas de *Aphelenchoides besseyi* rapporté récemment (Favoreto *et al.*, 2018). Le groupe des arthropodes, d'autant plus important qu'il peut affecter toutes les parties de la plante, représente la plus forte contrainte de production à côté des mauvaises herbes.

Les dégâts des arthropodes sont classiquement distingués en dégâts directs, dus à leur action de prélèvement qui peut aller jusqu'à la destruction des plantules, et en dégâts indirects, résultant de leur rôle de vecteur d'agents de maladies ou parce qu'ils souillent la fibre (déjections des punaises ou dépôts de miellats des pucerons, aleurodes, cochenilles, insectes regroupés sous le terme « piqueurs-suceurs »). De plus, ces dégâts se traduisent en pertes quantitatives (quantité de coton-graine récoltée) et en pertes qualitatives (liées à la qualité des fibres).

Pouvoir attribuer un type de dégât à un organisme donné est une étape clé en matière de protection des cultures. Dans la pratique toutefois, pour le cotonnier comme pour les autres plantes, certains dégâts ne sont pas facilement attribuables à un organisme déterminé. C'est ainsi le cas lorsque l'on se trouve en présence de jeunes plants coupés. De même, il peut s'avérer difficile de rapporter les dégâts foliaires visibles, taches, trous dans les feuilles (figure 9),

à l'action particulière d'un arthropode. La situation est encore plus complexe lorsqu'il y a une action conjuguée de nématodes, de maladies (champignons du genre *Fusarium*), voire de déficiences en éléments minéraux, cela à des époques différentes du cycle cultural.

De plus, attribuer l'origine d'un dégât à un agresseur de type arthropode, insecte ou acarien, qui de surcroît peut être d'origine locale/continentale ou cosmopolite, suppose que l'on soit en mesure d'identifier à l'espèce et sinon au genre l'invertébré incriminé. Il s'agit d'une étape qui peut se révéler complexe quand l'on considère à la fois l'extrême diversité des arthropodes et la variété des dégâts qu'ils peuvent causer au cotonnier; elle nécessite la mise en place de collaborations avec de nombreux taxinomistes et doit tenir compte du fait que certains grands groupes (taxons) restent encore sans spécialiste reconnu.

La diversité des dégâts causés au cotonnier

La plante peut être attaquée par les arthropodes à tous les stades de son développement (phase initiale de levée, phase végétative, phase fructifère), soit du semis à la récolte ainsi qu'au niveau de ses divers organes. La plus grande partie des dégâts ainsi causés est visible de l'extérieur, mais d'autres ne peuvent être détectés qu'après dissection et examen interne.

Dans le cas des boutons floraux, des fleurs et des capsules, ces dégâts directs ont, au niveau des pertes de production, une répercussion théoriquement immédiate. Toutefois, le cotonnier, plante pérenne, possède la capacité de compenser ces pertes lorsque les conditions d'alimentation hydrique (en lien avec le climat) et minérale le permettent.

Dégâts directs visibles de l'extérieur

Sur les plantules

Chronologiquement, la destruction des plantules constitue le premier dégât visible, généralement occasionné par une morsure. En Afrique, elle peut résulter de l'action de myriapodes comme les iules, notamment dans les régions où est cultivé un précédent comme l'arachide (Vayssière et Mimeur, 1925; Demange, 1957; Pierrard, 1970). Des chenilles peuvent également se développer rapidement et massivement certaines années, comme les Erebidae ou Arctiidae des genres *Amsacta* ou *Diacrisia* ou celles de *Spodoptera exempta* (F.) (Noctuidae), et détruire les plantules. Au Brésil, les chenilles s'étant alimentées dans les couvertures végétales implantées antérieurement à la culture du cotonnier, comme le Noctuidae *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith), peuvent également provoquer d'importants dégâts (figure 10) rendant nécessaire un nouveau semis. Enfin, des chenilles du genre *Agrotis* sont signalées dans la littérature ainsi que, au Brésil, l'espèce *Elasmopalpus lignosellus* Zeller (Pyralidae) (Bélot et Vilela, 2020).



Figure 8. Gastéropodes et leurs dégâts sur feuille de cotonnier (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, mars 2006)

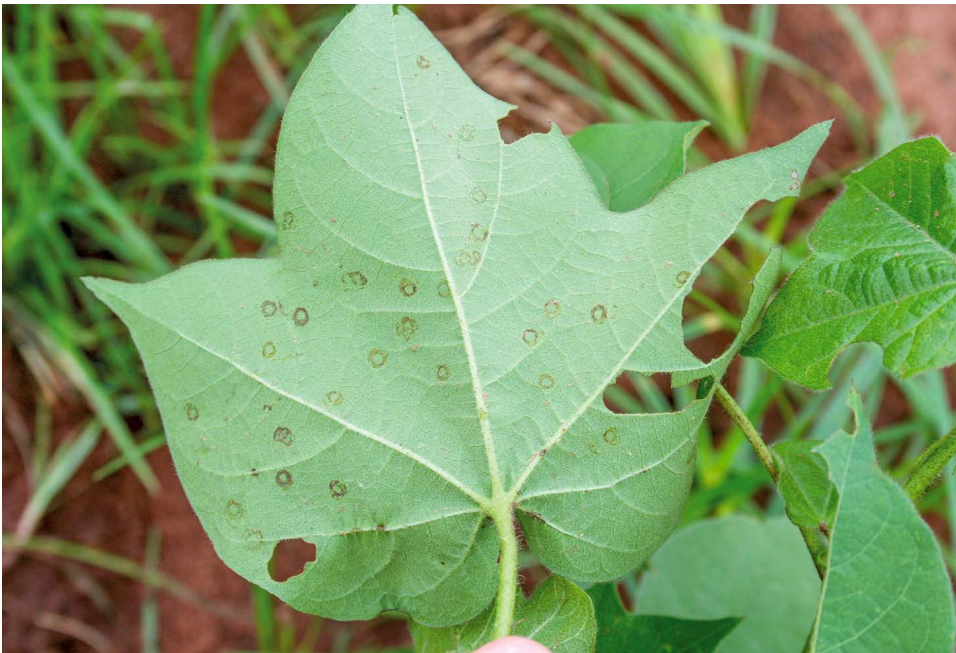


Figure 9. Dégâts circulaires d'origine inconnue sur feuille de cotonnier (Paraguay, Caacupe, janvier 2007)



Figure 10. Chenille de *Spodoptera frugiperda* ayant sectionné la tige d'une plantule de cotonnier en semis direct (Brésil, Mato Grosso, décembre 2005)



Figure 11. Nymphes de punaises *Dysdercus* s'alimentant sur les graines de cotonnier germées (Tchad, Bébedjia, juin 1987)

La présence de punaises Pyrrhocoridae du genre *Dysdercus* est parfois observée lors de la phase de germination des graines et de levée. Larves et adultes piquent les graines (figure 11), ce qui entraîne ultérieurement des problèmes de développement. Enfin, les plantules avec deux à quatre « vraies » feuilles formées peuvent être fortement infestées de pucerons, aleurodes, cicadelles ou thrips (thysanoptères), avec comme conséquence un aspect recroquevillé des feuilles entraînant un retard de croissance, sinon la mort des plantules dans le cas où une maladie virale est inoculée.

Sur la tige

Une perforation de la tige suivant la circonférence est le symptôme typique de l'attaque du Curculionidae *Alcidodes gossypii* (Hustache) observée par exemple au sud du Togo. Elle provoque la cassure de la tige (figure 12). La femelle de ce coléoptère pond ses œufs dans les trous ainsi causés et après éclosion, les larves se développent à l'intérieur de la tige, ce qui provoque ensuite le dessèchement de la partie supérieure de la plante.

Des dégâts peuvent avoir lieu également à la cime du cotonnier, avec la consommation du bourgeon terminal et le percement d'une petite galerie à l'intérieur de la tige même. Ces écimages sont souvent provoqués par des chenilles de lépidoptères Noctuidae (du genre *Earias*, par exemple).

Des plages noires (nécroses) peuvent être constatées le long des tiges ou des pétioles. Ce type de dégât, qui s'est avéré être à l'origine de cassures, a été observé au Brésil, sur des cotonniers génétiquement modifiés; il était le résultat de nombreuses piqûres de la punaise Pentatomidae *Edessa metidabunda* (F.) (figure 13). De telles nécroses peuvent également être observées en Afrique, dans le cas de la punaise *Helopelthis schoutedeni* Reuter.

La présence de cochenilles, récemment observées au Brésil (Bélot et Vilela, 2020), a été signalée dès 1949 par Brixhe et l'espèce *Phenacoccus solenopsis* Tinsley est connue en Inde (Nagrare *et al.*, 2009). Ces insectes provoquent des raccourcissements d'entre-nœuds et une déformation des tiges dans leur partie apicale.

Dans la tige (dessèchement des plants)

En Afrique, le dessèchement peut être dû à la présence de la larve du coléoptère Buprestidae *Sphenoptera gossypii* Kerremans au niveau du collet et des pivots (Mallamaire, 1949). Il faut ouvrir la tige pour observer ce déprédateur qui possède une tête « en forme de marteau » caractéristique (figure 14). De même, la présence de larves du coléoptère *Syagrus calcaratus* (F.) (Chrysomelidae) (figure 15), au niveau des racines, peut également aboutir à un dégât similaire. Cet insecte a été signalé comme particulièrement important au Burkina Faso (Streito et Nibouche, 1998).

Des plants jeunes et même des plants sur lesquels des capsules sont déjà visibles peuvent être atteints de dessèchement. Au sud du Brésil ou au Paraguay voisin, ces symptômes sont le résultat des attaques de *Eutinobothrus brasiliensis* (Hambleton), coléoptère Curculionidae dont la larve vit à l'intérieur des tiges de cotonnier

(Prudent, 1988). Certains plants desséchés peuvent cependant porter des capsules mûres assurant alors une certaine production (figure 16). Au Paraguay, les larves d'autres espèces de Curculionidae, comme *Conotrachelus denieri* Hustache ou *Chalcodermus niger* Hustache, sont susceptibles de perforer les tiges et les pétioles.



Figure 12. Dégât du coléoptère Curculionidae *Alcidodes* sp. sur tige de cotonnier (Togo, Elavagnon, novembre 1988).



Figure 13. Nécrose sur tige de cotonnier due à la punaise Pentatomidae *Edessa metidabunda* (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, mars 2006)

Sur l'épiderme inférieur des feuilles

Les dégâts foliaires sont de nature diverse selon l'insecte ou l'acarien responsable. L'épiderme de la partie inférieure de la feuille peut être détruit avec absorption du contenu des cellules, ce qui donne un aspect brillant, en comparaison à une feuille saine, comme cela est généralement observé dans le cas des dégâts de thrips (Thysanoptera).

Sur les limbes foliaires

S'agissant du limbe des feuilles, des degrés divers sont constatés dans les attaques. Une consommation partielle, limitée à la périphérie, peut être observée dans le cas de stades d'insectes à pièces buccales broyeuses (criquets, chenilles). Des trous sont occasionnés par diverses espèces de coléoptères Chrysomelidae, notamment en Amérique du Sud. Ils peuvent l'être aussi par les escargots, mais plus rarement. En Afrique, les altises adultes (Chrysomelidae Alticinae), surtout connues pour perforer les feuilles du gombo (*A. esculentus*, Malvaceae), s'attaquent également aux variétés de cotonniers *glandless* (Brader, 1967).



Figure 14. Larve à « tête de marteau » du coléoptère Buprestidae *Sphenoptera* sp. et dégâts dans la tige de cotonnier (Togo, Kolokopé, septembre 1989)



Figure 15. Adulte du coléoptère *Syagrus calcaratus* (Bénin, Alafiarou, septembre 1994)



Figure 16. Plant de cotonnier desséché (à gauche) à la suite des attaques du coléoptère *Eutinobothrus brasiliensis* (Paraguay, San Juan Bautista, janvier 2006)

La présence de galeries bien visibles sur la partie supérieure des limbes, avec des plages brillantes provoquées par la consommation des parties vertes, est le signe d'une attaque de chenilles mineuses de feuilles du genre *Acrocercop* (Lepidoptera, Gracillariidae) de couleur rose, ou de la présence de larves de diptères (Agromyzidae, genre *Liriomyza*) (figures 17 et 18).



Figure 17. Chenille rose de *Acrocercops* sp., l'épiderme de la feuille est enlevé pour laisser voir la chenille (Tchad, Bébedjia, juillet 1986)



Figure 18. Mine et larve du diptère *Liriomyza* sp. sous l'épiderme de la feuille de cotonnier (Brésil, Primavera do Leste, mars 2009)

Des dégâts « en dentelle » sur des feuilles ont été observés au Brésil dans des conditions de culture en milieu protégé (serre). Ils ont été attribués à la présence d'une espèce de lépidoptère Bucculatricidae du genre *Bucculatrix*. Dans le cas d'infestations massives de ces chenilles, la présence de cocons allongés blancs caractéristiques est remarquée et la consommation du limbe est telle qu'il ne peut subsister, éventuellement, que les nervures (figures 19 à 21).



Figure 19. Chenille et dégâts foliaires de *Bucculatrix* sp. sous serre (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, novembre 2005)



Figure 20. Dégâts dus aux chenilles de *Bucculatrix* sp. sous serre (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, novembre 2005)



Figure 21. Cocons du lépidoptère *Bucculatrix* sp. sous serre (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, novembre 2005)



Figure 22. Dégâts dits « en coups de couteau » dus aux acaridés *Polyphagotarsonemus latus* (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, octobre 2007)

Retard de croissance et déformations des feuilles

Des déformations des feuilles apicales (recroquevillement) et un retard de croissance peuvent résulter d'attaques de pucerons (*Aphis gossypii* Glover), de thrips ou de cicadelles telles que *Agallia albidula* Uhler (Cicadellidae) en Amérique du Sud. Un tel phénomène est une réaction de la plante à la salive toxique injectée par l'insecte piqueur-suceur.

Le croquevillement des bords des feuilles vers l'extérieur est le dégât caractéristique de l'acarien *Polyphagotarsonemus latus* Banks (Acari, Tarsonemidae). Il peut être suivi du déchirement du limbe (déchirures dites « en coups de couteau ») (figure 22).

Décolorations de plages foliaires

Les décolorations notées à la surface inférieure des feuilles, avec présence d'acariens tissant des toiles, sont le fait d'espèces de la famille des Tetranychidae, *Tetranychus urticae* Koch et *Tetranychus ludeni* Zacher, cette dernière étant présente en Amérique du Sud. La présence de plages rouges à la surface supérieure peut même être observée en cas de très fortes infestations. Des champs entiers présentant ces symptômes ont été observés au Brésil ou au Paraguay (figure 23). Par ailleurs, toujours dans ce dernier pays, une décoloration des feuilles peut être la conséquence de l'action de punaises de la famille des Tingidae (figures 24 et 25). Les punaises de la famille des Miridae, quant à elles, ont ceci de particulier qu'elles peuvent être la cause de décolorations ou de petits trous visibles sur les feuilles (figures 26 et 27) ; ces symptômes résultent des piqûres réalisées sur les feuilles repliées, antérieurement à leur expansion.

Un changement de couleur des bords des feuilles, qui virent du vert au jaune puis au rouge brun, est la conséquence des piqûres d'insectes de la famille des Cicadellidae tels que *Jacobiella* (= *Empoasca*) *facialis* (Jacobi) ou *Austroasca* (= *Jacobiasca*) *lybica* (Bergevin et Zanon). Toujours dans cette famille, l'espèce *Amrasca biguttula biguttula* (= *A. devastans*) (Distant), bien connue en Inde, a été observée en 2019 à Madagascar, y provoquant des dégâts spectaculaires (B. Bachelier, communication personnelle) (figure 28). La présence de cette cicadelle a été attestée en 2022 dans différents pays du continent africain (Togo, Bénin, Mali, Sénégal, Côte d'Ivoire) (Kouadio *et al.*, 2022). L'insecte est facile à détecter au stade adulte, car chacune de ses ailes porte un point noir.

Enroulement et consommation des feuilles

En Afrique, un enroulement en cornet des feuilles, qui seront ensuite consommées de l'intérieur, est observé dans le cas des chenilles phyllophages comme *Haritalodes* (= *Syllepte* = *Sylepta*) *derogata* (F.) (Lepidoptera, Crambidae) ; il procure à l'insecte une certaine protection vis-à-vis de ses prédateurs. Cette espèce poursuit son expansion géographique : elle a été identifiée récemment, pour la première fois, sur des espèces des genres *Hibiscus*, *Tilia* et *Abutilon* dans la région de Sotchi, au sud de la Russie (Karpun *et al.*, 2022) et tout récemment en Turquie sur *Hibiscus* sp. (Sezen *et al.*, 2024).



Figure 23. Dégâts des acariens tétranyques (Paraguay, route de Horqueta, octobre 2005)



Figure 24. Dégâts de la punaise *Gargaphia torresi* (Paraguay, Calle 4000, janvier 2004)

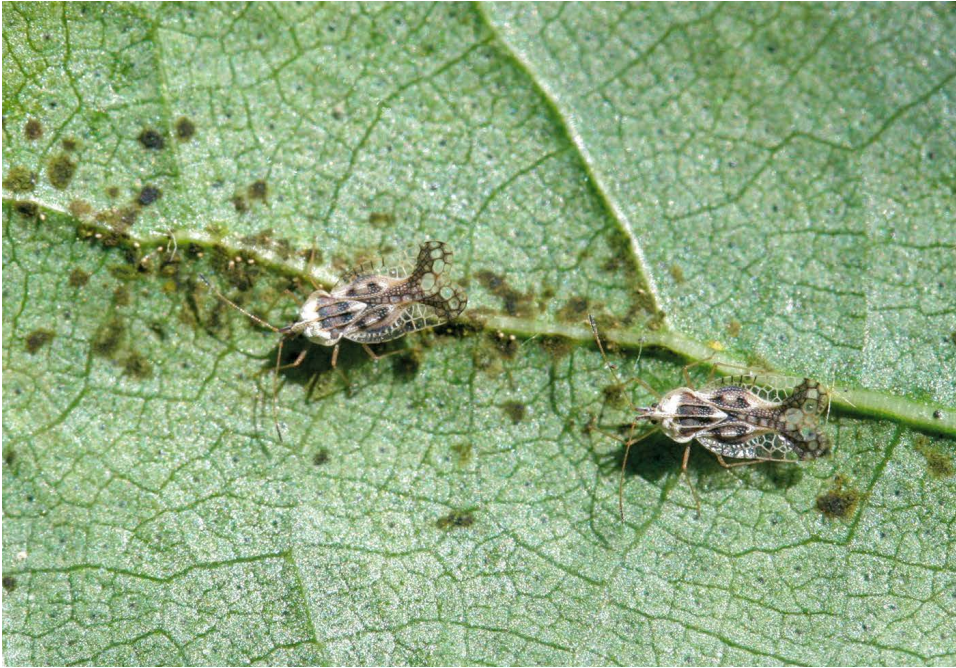


Figure 25. Adultes de la punaise *Gargaphia torresi* et dégâts (taches noires) sous une feuille de cotonnier (Brésil, Brasilia, jardin Lago Sul, juin 2008)

Dans le cas où l'épiderme de la partie supérieure du limbe apparaît oxydé, il s'agit de morsures par les pièces buccales broyeuses du coléoptère Melyridae *Astylus variegatus* (Germar) (figure 29).

Une défoliation est causée par les chenilles des espèces des genres *Xanthodes* (Noctuidae) et *Euproctis* (Erebidae) (figures 30 à 32) mais elle est rarement importante. La consommation totale des feuilles est le stade ultime des attaques des chenilles de *H. derogata*, *Anomis flava* (F.) ou d'espèces du genre *Spodoptera*.

Attaques sur les organes floro-fructifères

La destruction des organes floro-fructifères (boutons floraux, fleurs, capsules vertes) est essentiellement la conséquence d'attaques par des chenilles appartenant à la famille des Noctuidae (genres *Heliothis*⁷, *Helicoverpa*, *Diparopsis*, *Earias*, *Spodoptera*). Les dégâts sont facilement visibles car les bractées de l'organe sont écartées, ce qui laisse voir de l'extérieur le trou provoqué par l'alimentation de la chenille. Ces organes peuvent également être attaqués en cas de très fortes infestations par des chenilles considérées comme phyllophages (*Spodoptera littoralis*, *Alabama argillacea*).

⁷ L'espèce *Heliothis virescens* (Fabricius) a été rebaptisée *Chloridea virescens* (Fabricius) il y a une dizaine d'années (Pogue, 2013). L'ancien nom de genre, encore très utilisé, a été conservé dans cet ouvrage.

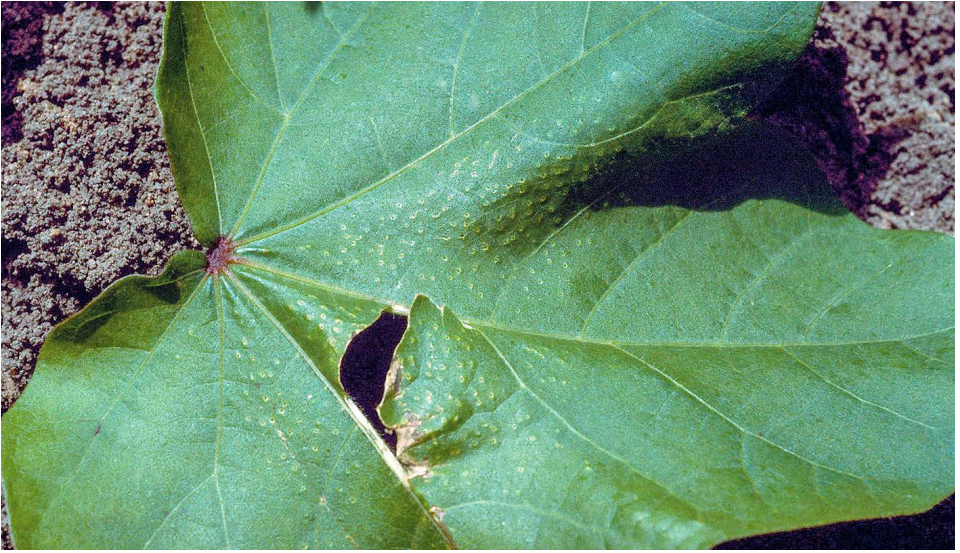


Figure 26. Dégâts de piqûres d'origine indéterminée (face supérieure de la feuille) (Tchad, Bébedjia, 1985)

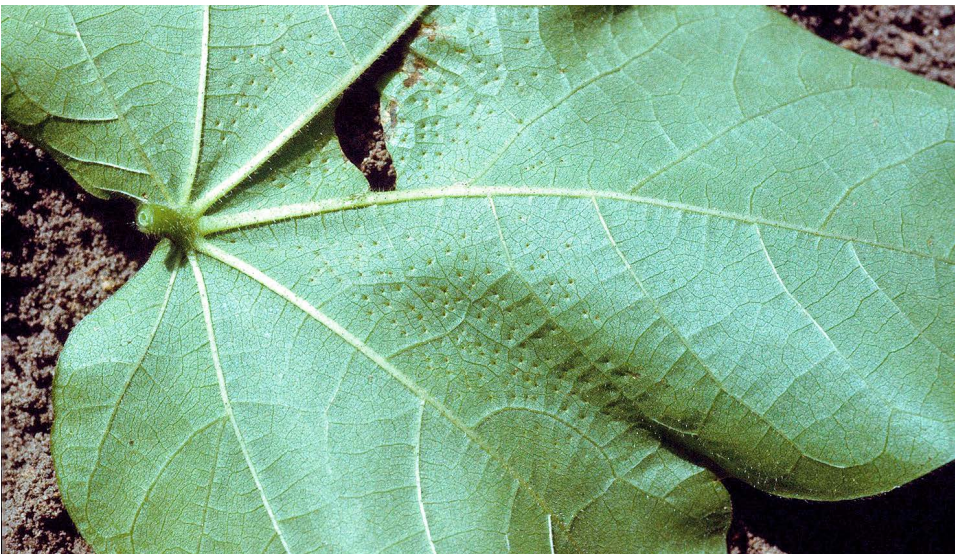


Figure 27. Dégâts de piqûres d'origine indéterminée (face inférieure de la feuille) (Tchad, Bébedjia, 1985)

Boutons floraux

Les boutons floraux, d'aspect desséché et de couleur terne, durs au toucher et que l'on rencontre sur des plants déjà âgés dans les plantations américaines, peuvent héberger une larve ou une nymphe, indice de la ponte antérieure faite par l'anthonyme, *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera, Curculionidae) (figures 33 à 35).



Figure 28. Dégâts de la cicadelle *Amrasca biguttula* (= *devastans*) sur cotonnier (Madagascar, avril 2019). Crédit photo : Bruno Bachelier.



Figure 29. Dégâts du coléoptère *Astylus* sp. sur feuille de cotonnier (Brésil, Paraná, Cascavel, janvier 2005)



Figure 30. Chenille de *Xanthodes* sp. (Noctuidae) (Tchad, Bébedjia, 1985)



Figure 31. Chenille de *Euproctis* sp. (Erebidae) (Tchad, Bébedjia, janvier 1987)

En Inde, des attaques de boutons floraux de cotonniers génétiquement modifiés par le diptère Cecidomyidae *Dasineura gossypii* Fletcher ont été signalées et illustrées par Udikeri *et al.* (2011) et Chakraborty *et al.* (2015).

Fleurs

Faciles à repérer, les fleurs dites « en rosette » résultent de l'action du ver rose, *Pectinophora gossypiella* Saunders, une espèce cosmopolite de la famille des Gelechiidae. Certains Meloidae peuvent s'alimenter des pétales de fleurs du cotonnier, ainsi que d'autres Malvaceae cultivées comme le gombo, *A. esculentus*.

Capsules vertes

Sur les deux continents, différentes espèces de cétoines (Coleoptera, Scarabaeidae) (figure 36) peuvent être responsables de perforations observées sur les capsules ou associées à celles initialement causées par des chenilles. Il semble que ces coléoptères soient attirés par les composés volatils émis à partir des capsules trouées.

En Afrique, la présence sur les capsules vertes de légères dépressions arrondies, de couleur marron dans l'ensemble mais plus marquées à la périphérie, est la conséquence caractéristique des piqûres de la punaise Miridae *Helopeltis schoutedeni* Reuter (figure 37). Ces dégâts, bien que caractéristiques de cet insecte, ne sont toutefois pas spécifiques car ils ressemblent fortement à des taches de bactériose, d'où un risque de diagnostic erroné.

Sur ce même continent, la présence à la surface d'une capsule verte d'un filament constitué des restes d'alimentation (fèces) (figure 38) indique la présence — interne — d'une chenille de *Thaumatotibia* (= *Cryptophlebia*) *leucotreta* (Meyrick) (Tortricidae).



Figure 32.
Adulte de *Euproctis* sp.
avec sa ponte sur un pétiole
de cotonnier (Tchad, Bébedjia,
janvier 1987)



Figure 33. Anthonome du cotonnier (*Anthonomus grandis grandis*) perforant un bouton floral (Paraguay, Tomás Romero Pereira, février 2002)



Figure 34. Trou de ponte de l'anthonome du cotonnier rebouché sur un bouton floral (Brésil, Paraná, route Guaira-Marechal C. Rondon, janvier 1999)



Figure 35. Adulte de *Anthonomus grandis* prêt à émerger d'un bouton floral desséché (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, mai 2003)



Figure 36. Cétoines (*Smaragdesthes africana*) sur capsule verte (Bénin, Sékou, octobre 1995)



Figure 37. Symptômes de piqûres de la punaise Miridae *Helopeltis* sp. sur capsule verte (Tchad, Bébedjia, octobre 1986)



Figure 38. Tortillon d'excréments révélant la présence de la chenille *Thaumatotibia* (= *Cryptophlebia*) *leucotreta* à l'intérieur d'une capsule verte (Togo, Kolokopé, novembre 1988)

D'autres dégâts directs sur capsules vertes sont plus rarement observés. Ainsi, au Paraguay, les morsures de *Costalimaita ferruginea* (Fabricius) (Coleoptera, Chrysomelidae) laissent des traces de zones brunes (oxydées) (figure 39). Le lépidoptère *Argyrotaenia spheropa* Meyrick (Tortricidae) (figure 40) a été reconnu responsable, en janvier 2007 au Brésil, dans l'État du Mato Grosso, de dégâts sur les boutons et les capsules (figures 41 et 42). La présence de cet insecte ainsi que celle de deux autres espèces (*Mescinia peruella* Schauss et *Pococera atramentalis* Led)



Figure 39. Symptômes de morsures du coléoptère *Costalimaita ferruginea* sur capsule verte (Paraguay, Coronel Bogado, janvier 2006)



Figure 40. Adulte du Tortricidae *Argyrotaenia spheropa* (Brésil, Paraná, Palotina, janvier 2007)

avaient été observées au Pérou comme résultant de l'usage des insecticides de synthèse sur le cotonnier (Herrera Aratiguera, 1961). Une fois ces insecticides retirés, ces insectes n'ont plus été signalés, en raison d'une régulation biologique naturelle redevenue effective.



Figure 41. Dégât de la chenille *Argyrotaenia spheropa* sur bouton floral (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, avril 2007)



Figure 42. Dégât de la chenille *Argyrotaenia spheropa* sur capsule verte (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, avril 2007)

Une autre famille, celle des acariens Eriophyidae, est signalée dans la littérature comme provoquant des dégâts sur les feuilles, dégâts parfois qualifiés de *bronzing* (Gutierrez, 1992).

Attaques dans ou sur les graines

Après la récolte et l'égrenage, les graines des espèces et des variétés de cotonniers portant des glandes à gossypol ne sont pas attaquées par des insectes durant leur stockage. À l'inverse, et à l'instar des cultures vivrières de céréales et de légumineuses, les variétés *glandless*, sans glandes à gossypol, sont attaquées par les rats, au champ notamment, et par les insectes dans les denrées stockées.

Dégâts directs invisibles de l'extérieur

Les dégâts à l'intérieur des organes fructifères du cotonnier sont provoqués par des insectes piqueurs-suceurs ou par des insectes à pièces buccales broyeuses.

À l'intérieur des boutons floraux, l'atrophie des étamines résulte des piqûres de punaises, notamment de Miridae.

Après l'ouverture des capsules vertes, la présence d'un cal de réaction de la plante sur l'intérieur du carpelle et éventuellement de taches sur la fibre et sur les graines en formation est aussi liée à l'action de punaises, Pentatomidae par exemple.

Il importe également d'ouvrir les capsules encore vertes pour détecter l'action des chenilles de *P. gossypiella* (ver rose) et de *T. leucotreta*. Les dégâts sont variables selon le stade atteint par l'insecte en développement. Une ou plusieurs loges de la capsule peuvent être consommées et les excréments souillent les fibres, ce qui entraîne généralement des pourritures. La capsule ne sera donc pas utilisable dans sa totalité ou la qualité de la fibre sera affectée. Dans le cas du ver rose, les chenilles entrent en diapause dans les graines en fin de saison (une chenille par graine). En présence de fortes infestations, des quantités très importantes de semences peuvent être ainsi perforées et détruites (figure 43). C'est l'une des raisons pour lesquelles est recommandée la destruction des résidus de récolte laissés au champ, et en particulier des capsules mal formées non récoltées. Le passage des bœufs qui broutent ces résidus, en Afrique, se révèle ainsi une pratique avantageuse.

Une fois ouvertes, les capsules mûres attirent surtout les insectes intéressés par les graines, comme les punaises *Oxycarenus hyalinipennis* (Costa) et des espèces du genre *Dysdercus*. Leurs dégâts ne seront visibles que si l'on ouvre la graine piquée. De plus, les excréments de ces punaises peuvent se déposer sur les fibres de la capsule ouverte, provoquant ainsi des salissures qui détériorent leur qualité.

Dégâts indirects et dégâts occasionnels

Les dégâts indirects les plus importants sont ceux imputables aux maladies dont l'agent étiologique est transmis par un arthropode vecteur, à savoir la « maladie bleue », la mosaïque et la psyllose, transmises respectivement par des pucerons,

par des aleurodes et par la psylle *Paurocephala gossypii* Russell, cette dernière maladie signalée en Afrique centrale dès 1945 (Brixhe, 1949). La virescence florale du cotonnier, ou phyllodie, observée en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso par Delattre (1965, 1968), Laboucheix *et al.* (1973) et Follin (1982), est causée par un phytoplasme dont le vecteur est la cicadelle *Orosius cellulosus* (Lindenberg). L'agent pathogène a été identifié également au Mali sur *Sida cordifolia* (L.), qui peut jouer un rôle de réservoir de la maladie (Marzachi *et al.*, 2009). Les organes fructifères sont transformés en organes foliacés (figure 44), ce qui rend stériles les plants atteints.

Un autre dégât indirect est la momification des capsules consécutive à l'entrée de micro-organismes pathogènes ou saprophytes — genres *Nematospora*, *Xanthomonas*, *Fusarium* — (Pearson, 1948 ; Brixhe, 1961 ; Lagière, 1966 ; AGCD, 1992) après l'action de piqûres d'insectes ou l'entrée d'une chenille.

Le phénomène de coton « collant » est provoqué par le dépôt des fèces riches en sucres (miellats) des insectes piqueurs-suceurs (pucerons, aleurodes, cochenilles). Sur ces miellats collants se développe la fumagine (champignon). Ces dépôts sur les fibres des capsules mûres ouvertes sont à l'origine de difficultés techniques dans toutes les opérations de traitement de la fibre, de l'égrenage du coton-graine souillé jusqu'à la teinture, en passant par la filature, le tissage ou le tricotage (Gourlot et Drieling, 2021).

En plus de ces dégâts, des ravageurs (cas des cicadelles) peuvent causer des perturbations physiologiques qui auront un impact sur la qualité technologique des fibres (impact révélé par un indice micronaire⁸ faible et une faible ténacité).

Retenons de ces inventaires des dégâts que, dans la plupart des cas, l'organisme responsable du dégât est connu, sur un continent ou un autre. Dans le contexte du changement global, qui inclut le dérèglement climatique et les échanges commerciaux internationaux propices aux espèces envahissantes, l'échange des connaissances acquises et leur confrontation sont un élément appréciable pour faciliter la surveillance internationale des signalements de nouveaux dégâts et insectes sur le cotonnier.

La diversité des arthropodes phytophages du cotonnier

En dehors des dégâts occasionnés en début de cycle cultural sur les plantules par divers groupes taxinomiques (voir section « Dégâts directs visibles de l'extérieur », chapitre 2), les insectes et les acariens représentent les principaux responsables des dégâts et des pertes durant les phases végétative et productive du cotonnier. La diversité de ces dégâts et de ces pertes témoigne de la diversité des agresseurs, arthropodes en cause. Comme cette diversité a été rapportée dans de nombreux ouvrages signalés en introduction, nous la soulignerons d'abord ici de manière globale, par grands groupes taxinomiques et par comparaison entre le continent africain et le continent sud-américain (tableau 1).

⁸ Cet indice rend compte de la maturité et de la finesse de la fibre (Crétenet et Gourlot, 2016).



Figure 43. Graines de cotonnier perforées par la chenille de *Pectinophora gossypiella* (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, février 2000)



Figure 44. Symptômes de phyllodie, maladie transmise par *Orosius cellulosus* (Burkina Faso, janvier 1963). Crédit photo : Robert Delattre.

Un complexe variable selon l'Afrique et l'Amérique du Sud

Les différences qui apparaissent entre le complexe des ravageurs du cotonnier en Afrique d'une part et celui en Amérique latine d'autre part ressortent directement par comparaison des données du tableau 1. Les espèces y sont énumérées par groupes entomologiques majeurs et disposées en miroir selon la similitude de leurs niches écologiques qui correspondent à leur régime alimentaire. De plus est signalé pour chaque espèce son statut : espèce régionale ou continentale, espèce cosmopolite, espèce exotique envahissante.

Ce tableau a été établi à partir des listes des espèces présentes dans les pays où les observations ont été faites, en particulier au Tchad, au Togo et au Bénin pour l'Afrique, au Paraguay et au Brésil pour l'Amérique latine. Les noms d'auteurs des espèces y sont précisés dans le seul cas où ils n'ont pas encore été mentionnés dans le texte. La liste des espèces rencontrées sur le cotonnier n'est pas exhaustive, des espèces pouvant être signalées dans la littérature⁹. Les diptères et les cochenilles n'y sont pas mentionnés, de même que la grande diversité des hémiptères qui ont fait l'objet à eux seuls de manuels d'identification (Couilloud, 1989 ; Michel, 1993a ; Poutouli *et al.*, 2011).

Tableau 1. Diversité spécifique comparée et organes attaqués par les principaux ravageurs du cotonnier entre les continents sud-américain et africain

| | Amérique latine (Paraguay, Brésil) | Afrique subsaharienne |
|---------------------|---|--|
| Lépidoptères | <i>Alabama argillacea</i> ^a (Hübner) (F) | <i>Haritalodes derogata</i> ^a (F) |
| | <i>Chrysodeixis includens</i> ^a (F) | <i>Anomis flava</i> ^a (F) |
| | <i>Trichoplusia ni</i> ^a (F) | - |
| | <i>Spodoptera eridania</i> ^a (Stoll) (F) | <i>Spodoptera littoralis</i> ^a (Boisduval) (F) |
| | <i>Spodoptera frugiperda</i> (F, OF) | <i>Spodoptera frugiperda</i> ^c (F, OF) |
| | <i>Spodoptera cosmioides</i> ^a (Walker) (F) | - |
| | <i>Helicoverpa armigera</i> ^c (F, OF) | <i>Helicoverpa armigera</i> (F, OF) |
| | <i>Heliothis virescens</i> ^a (F, OF) | <i>Diparopsis watersi</i> ^a (Rothschild) (BF) |
| | <i>Helicoverpa zea</i> ^a (F, OF) | <i>Diparopsis castanea</i> ^a Hampson (BF) |
| | | <i>Earias</i> spp. (OF, T) |
| | <i>Pectinophora gossypiella</i> ^b (Fl, Ca) | <i>Pectinophora gossypiella</i> ^b (Fl, Ca) |
| | <i>Thaumatotibia leucotreta</i> ^a (Ca) | |
| | <i>Mussidia nigrivenella</i> ^a (Ca) | |
| | <i>Agrotis ipsilon</i> ^b Hufnagel (Pl) | <i>Agrotis ipsilon</i> ^b Hufnagel (Pl) |
| Coléoptères | <i>Eutinobothrus brasiliensis</i> ^a (T) | <i>Sphenoptera gossypii</i> ^a (T) |
| | <i>Conotrachelus denieri</i> ^a (T) | <i>Syagrus calcaratus</i> ^a (T) |
| | <i>Anthonomus grandis</i> ^a (BF, Ca) | - |
| | Chrysomelidae (genre <i>Colaspis</i> ...) (F) | Chrysomelidae Alticinae (genres <i>Podagrixena</i> , <i>Nisotra</i>) (sur cotonniers sans glandes à gossypol) (F) |
| Hétéroptères | <i>Dysdercus chaquensis</i> ^a Freiberg (G, Ca) | <i>Dysdercus voelkeri</i> ^a Schmidt (G,Ca) |
| | <i>Dysdercus peruvianus</i> ^a Guérin-Méneville | - |
| | Miridae (F, Ét) | Miridae (F, Ét) |
| | Pentatomidae (F, T, Ca) | Pentatomidae (F, T, Ca) |

⁹ Pour les Thysanoptera, par exemple.

| | Amérique latine (Paraguay, Brésil) | Afrique subsaharienne |
|----------------------|---|--|
| Homoptères | <i>Aphis gossypii</i> ^b (F) | <i>Aphis gossypii</i> ^b (F) |
| | <i>Bemisia tabaci</i> ^b (F) | <i>Bemisia tabaci</i> ^b (F) |
| | <i>Agallia albidula</i> ^a (F) | - |
| | - | <i>Amsacta devastans</i> ^c (F) |
| | - | <i>Jacobiella facialis</i> ^a (F) |
| | - | <i>Austroasca</i> (= <i>Jacobiasca</i>) <i>lybica</i> (F) |
| | - | <i>Orius celulosus</i> ^a (F) |
| Thysanoptères | <i>Frankliniella schultzei</i> ^b Trybom (F) | <i>Frankliniella schultzei</i> ^b (Trybom) (F) |
| | - | <i>Megalurothrips sjostedti</i> ^a (Trybom) |
| Acariens | <i>Tetranychus urticae</i> ^b , <i>T. ludeni</i> ^a (F) | <i>Tetranychus urticae</i> ^b (F) |
| | <i>Polyphagotarsonemus latus</i> ^b (F) | <i>Polyphagotarsonemus latus</i> ^b (F) |

Légendes : ^a espèce régionale ou continentale, ^b espèce cosmopolite, ^c espèce exotique envahissante. Organes affectés : (BF), bouton floral; (F), feuille; (Fl), fleur; (T), tige; (Ca), capsule verte; (OF), organe fructifère; (Pl), plantule; (G), graine; (Ét), étamines.

Ajoutons encore, sur le plan pratique, que la répartition de certaines espèces au sein de catégories ou groupes fonctionnels peut parfois s'avérer problématique. Ainsi, certaines punaises de régime phytophage comme celles appartenant au genre *Dysdercus* peuvent se comporter occasionnellement comme des prédateurs, y compris à l'égard des individus de leur propre espèce. Il en est de même dans le cas des punaises Miridae, pour lesquelles le terme « zoophytophage » a été introduit il y a une dizaine d'années (Castañé *et al.*, 2011 ; Dalin *et al.*, 2011).

Chaque niche écologique et chaque régime alimentaire sont représentés de chaque côté du tableau, avec un nombre d'espèces importantes variables, selon le groupe taxinomique et le continent. Ainsi, une plus grande importance des lépidoptères et des homoptères est constatée en Afrique tandis que le groupe des coléoptères est davantage présent en Amérique latine.

À la lecture du tableau, différentes catégories d'espèces peuvent être globalement distinguées, étant entendu que la diversité des taxons est discutée plus avant dans la section suivante (voir section « La diversité taxinomique des espèces d'insectes », chapitre 2) :

- des espèces cosmopolites, dont les niches écologiques occupées sont les mêmes de part et d'autre de l'océan Atlantique, telles que le puceron *A. gossypii*, l'aleurode *B. tabaci*, les acariens *P. latus* ou *T. urticae*, ou le lépidoptère *P. gossypiella*. On sait maintenant, tout au moins pour certaines d'entre elles, qu'elles peuvent regrouper des biotypes aux caractéristiques biologiques différentes ;
- des espèces fortement liées au contexte régional ou continental, telles que les lépidoptères *Alabama argillacea* (Amérique) et *Haritalodes derogata* (Afrique), dont les chenilles phyllophages occupent des niches écologiques semblables, les chenilles de la dernière espèce étant toutefois les seules à enrouler les feuilles du cotonnier ;

– des espèces étant devenues récemment des espèces exotiques envahissantes, telles que *H. armigera*, pour l'Amérique du Sud (Czepak *et al.*, 2013; Tay *et al.*, 2013) et *S. frugiperda* pour le continent africain puis le reste du monde.

En ce qui concerne le groupe des lépidoptères, dont les adultes ont généralement un aspect terne (figure 45), une particularité existe en Afrique subsaharienne au niveau de la répartition géographique, de la biologie et de l'importance économique de certaines espèces à chenilles à mode de vie qualifié d'« endocarpique », car rencontrées à l'intérieur des capsules vertes. À l'inverse de *P. gossypiella*, inféodée au cotonnier, les espèces *T. leucotreta* et *M. nigrivenella* sont polyphages. La présence de ces deux dernières espèces, dans les régions sud du Bénin, du Togo et de Côte d'Ivoire, est liée à l'existence de deux saisons des pluies, résultant des déplacements sud-nord, et inversement, du front inter-tropical, ce qui permet ainsi la culture du maïs en seconde saison des pluies. Dans ces trois pays, des régions différentes peuvent ainsi être définies en matière de protection phytosanitaire du cotonnier.

Comme déjà indiqué, le groupe des coléoptères apparaît plus important en Amérique latine qu'en Afrique subsaharienne, notamment avec le ravageur majeur



Figure 45. Deux espèces de lépidoptères signalées sur le cotonnier, *Pectinophora* (= *Gelechia*) *gossypiella* et *Pyroderces simplex*. Source : D.R., @Cirad.

qu'est l'anthonome du cotonnier. Sa présence ou son absence au sein d'un même pays (Argentine, Brésil) entraîne également la délimitation de zones à gestion phytosanitaire différente.

En dehors de l'anthonome, ravageur majeur du cotonnier sur les continents américains (Azambuja et Degrande, 2013), il sera essentiel de surveiller sur le continent africain d'une part l'entrée et l'établissement de l'espèce *Spodoptera cosmioides* (Walker) (Lepidoptera, Noctuidae) observée sur le cotonnier au Brésil et d'autre part la propagation d'espèces déjà présentes telles que la cicadelle *Amsacta devastans* (Distant) ou le lépidoptère *Spodoptera eridania* (Cramer) (figures 46 et 47), dont les chenilles ont été identifiées sur d'autres plantes dans quatre pays africains (Goergen, 2018).

La diversité taxinomique des espèces d'insectes

Orthoptères Acrididae

L'ordre des orthoptères, non mentionné dans le tableau 1, est toutefois signalé ici car s'il est effectivement très peu présent sur le cotonnier communément cultivé (*G. hirsutum* à glandes à gossypol), des dégâts ont parfois été observés au Paraguay sur des cotonniers génétiquement modifiés.

Lépidoptères

L'ordre des lépidoptères est extrêmement bien représenté, avec des espèces appartenant principalement à la famille des Noctuidae, certaines ayant un régime alimentaire fortement lié au genre *Gossypium* comme les espèces du genre *Diparopsis*, d'autres étant au contraire très polyphages comme *Helicoverpa armigera* (Hübner). On distingue des espèces phyllophages, dont les chenilles consomment essentiellement les feuilles, et des espèces carphophages qui s'alimentent majoritairement sur les organes floraux ou fructifères (boutons floraux, capsules vertes) après s'être attaquées aux feuilles au cours des premiers stades larvaires.

L'identification systématique des espèces rencontrées à partir de l'observation directe des chenilles conservées en alcool ou de celle d'adultes obtenus après élevage peut permettre de caractériser la composition du complexe d'espèces présentes. Elle est particulièrement utile dans le cas des chenilles endocarpiques. Cette vérification a pu révéler la présence de chenilles de l'espèce *Mussidia nigrivenella* Ragonot (Lepidoptera, Pyralidae), connue comme ravageur du maïs au Bénin. L'importance numérique de ce ravageur fut constatée sur le cotonnier pour la première fois au Togo (Silvie, 1990b), mais l'insecte était signalé sur le cotonnier dès 1925 par Pomeroy, au Nigeria. Elle dépassait dans certaines localités celle des autres espèces endocarpiques présentes jusque-là, mieux connues, telles que *T. leucotreta* ou *P. gossypiella* (Silvie, 1993).

Appliquée dans la situation du Brésil, cette vérification de routine aurait sans doute permis de détecter plus tôt la présence de *H. armigera* sur le cotonnier dans ce pays (Czepak *et al.*, 2013 ; Tay *et al.*, 2013). On peut noter, rétrospectivement, que ses attaques précoces sur le soja constituaient un signe d'alerte de sa présence.



Figure 46. Dégât foliaire des chenilles de *Spodoptera eridania* vu sur la face supérieure d'une feuille de cotonnier (Brésil, Mato Grosso, avril 2009)



Figure 47. Dégât foliaire et chenilles de *Spodoptera eridania* vus sur la face inférieure d'une feuille de cotonnier (Brésil, Mato Grosso, avril 2009)

En fait, les chenilles responsables de ces attaques n'avaient pas été identifiées, d'une part, car le soja est généralement infesté par d'autres chenilles de Noctuidae, dont *Anticarsia gemmatalis* (Hübner) et *Chrysodeixis* (= *Pseudoplusia*) *inclusens* (Walker) (Noctuidae), et d'autre part, parce que les espèces connues de la sous-famille des Heliothinae sur le continent étaient *Helicoverpa zea* (Boddie), présente surtout sur le maïs, et *Heliothis virescens* (F.), connue sur le cotonnier. Aujourd'hui, des hybridations entre *H. armigera* et *H. zea* sont rapportées au Brésil (Rios *et al.*, 2021) ou étudiées à Puerto Rico (Flores-Rivera *et al.*, 2022). Il est donc à craindre que *H. armigera* se retrouve signalée sur le continent nord-américain.

Ces faits soulignent l'importance de réaliser une surveillance continue et une réidentification systématique des espèces rencontrées, notamment lorsqu'un événement nouveau est observé. Par ailleurs, au sein d'une même espèce, la différenciation de biotypes par des études moléculaires peut également apporter des informations intéressantes. C'est le cas de l'espèce exotique envahissante *Spodoptera frugiperda*. Au Brésil, il a été possible de confirmer dans les populations de l'État du Mato Grosso l'existence des deux biotypes connus aux États-Unis (en Floride et au Texas) : le biotype C, présent sur le maïs et le cotonnier, et le biotype R, dominant sur le mil et d'autres graminées (Nagoshi *et al.*, 2007a et 2007b). Une différence de gestion des populations de cette espèce pourrait donc être envisagée en fonction du biotype présent, comme cela a été récemment évoqué en Colombie où les deux biotypes sont également identifiés (Saldamando et Vélez-Arango, 2010). Les connaissances issues des recherches effectuées sur cette espèce sur le continent américain (États-Unis et pays d'Amérique latine) apportent un éclairage utile sur la question, après la première identification en 2016 sur le continent africain (Goergen *et al.*, 2016), puis le constat de sa dissémination jusqu'en Chine, puis en Australie en quelques années (Zhou *et al.*, 2021; Maino *et al.*, 2021). Dans les nouvelles régions où *S. frugiperda* a été identifiée, la plante attaquée majoritairement reste le maïs, mais des dégâts sur le cotonnier ont été signalés au nord du Bénin et de la Côte d'Ivoire (PR-PICA, Programme régional de production intégrée du coton en Afrique) et une lourde menace pèse sur le riz en Asie en cas d'attaques par ce ravageur.

Coléoptères

Sur le continent africain, l'ordre des coléoptères ne représente généralement pas, sauf exception, une menace pour la culture du cotonnier.

Toutefois, le caractère phénotypique « absence de gossypol » dans les variétés dites *glandless* confère le statut de ravageurs aux coléoptères du groupe des Chrysomelidae Alticinae tels que *Podagrixena* (= *Podagrica*) *decolorata* (Duvivier) et *Nisotra* (= *Podagrica*) *dilecta* (Dalman), qui se développent aux dépens du feuillage du cotonnier. Ces deux espèces peuvent être massivement observées sur le gombo.

Il en est autrement sur le continent américain (figure 48), où l'anthonome du cotonnier *A. grandis* (Curculionidae) a été à l'origine de l'abandon de la culture de la plante dans l'État de l'Alabama, aux États-Unis, qui lui a même consacré une statue dans la ville d'Entreprise, en 1919. L'abandon de la culture du cotonnier a en effet entraîné une diversification de l'agriculture et la prospérité de la ville.



Figure 48. Traitement contre l'anthonome du cotonnier aux États-Unis au début du xx^e siècle.
Source : Paul Vayssière, Fonds historique Cirad.

En Amérique du Sud, l'anthonome du cotonnier a été observé en 1949 au Venezuela et en 1950 en Colombie, mais l'invasion de l'Amérique du Sud s'est faite à partir du Brésil, via une entrée double, d'une part par le Nordeste avec une observation faite en juillet 1983 dans l'État de Paraíba, d'autre part par la région sud avec une observation faite à la mi-février 1983 près de Campinas, dans l'État de São Paulo (Barbosa *et al.*, 1986; Marengo Lozada *et al.*, 1987). Sa présence au Paraguay a été signalée officiellement pour la première fois en avril 1991 (Manessi, 1997) et il a atteint l'Argentine en 1993 où des mesures phytosanitaires particulières ont été décrétées dans une zone rouge qualifiée de quarantaine¹⁰. La manière dont l'anthonome du cotonnier s'est établi dans les conditions climatiques du Nordeste brésilien peut faire craindre le pire pour le continent africain, si l'insecte y était accidentellement introduit.

Hémiptères sternorhynques et auchénorhynques

De nombreux insectes de l'ordre des hémiptères (punaises, aleurodes, pucerons, cochenilles) peuvent être rencontrés sur le cotonnier (Couilloud, 1989; Michel, 1993a) soit en raison d'un caractère phénotypique favorisant leur installation sur la plante, tel que l'absence de pilosité comme pour les cicadelles ou «jassides», soit parce que le cotonnier, qui fait partie d'un environnement cultural déjà fortement infesté par les «vraies» punaises (Poutouli *et al.*, 2011), peut servir de plante-relais pour d'autres espèces du même ordre. C'est le cas de nombreuses espèces de la famille des Pentatomidae, qui peuvent s'alimenter sur le cotonnier et même y accomplir leur cycle complet de développement. Ainsi, au Brésil, des espèces classiquement considérées comme inféodées au soja telles que *Euschistus heros* (Fabricius) sont retrouvées sur le cotonnier.

D'autres hémiptères, comme les espèces du genre *Dysdercus*, apparaissent toutefois très liés à la famille botanique à laquelle appartient le cotonnier. Comme le montre le nombre croissant de publications sur le sujet, le développement des cotonniers génétiquement transformés («cotonniers Bt») a entraîné une résurgence des Miridae, punaises discrètes qui étaient, jusqu'alors, probablement éliminées par l'usage des insecticides appliqués contre les chenilles visées.

Dans le cas de l'aleurode *Bemisia tabaci* Gennadius, la différenciation de biotypes grâce aux outils moléculaires s'avère aujourd'hui indispensable, étant donné que les dégâts et le degré de résistance aux insecticides sont variables selon le biotype (De Barro *et al.*, 2011; Horowitz *et al.*, 2011). La vécution de maladies, connue chez *B. tabaci*, est également rapportée chez un autre insecte piqueur-suceur cosmopolite : le puceron *Aphis gossypii*, qui peut notamment transmettre le virus de la «maladie bleue» (voir section «La résistance génétique», chapitre 6).

¹⁰ <https://www.argentina.gob.ar/senasa/programas-sanitarios/cadena-vegetal/industriales-Producci%C3%B3n-primaria/programas-fitosanitarios/Picudo-algodonero#:~:text=El%20picudo%20del%20algodonero%20pertenece,%2C%20larva%2C%20pupa%20y%20adulto>

Chapitre 3

La régulation naturelle par les arthropodes et par les micro-organismes

Dans la pratique, la régulation biologique naturelle peut être qualitativement observée au champ, à l'aide de constats de prédation et/ou de parasitisme correspondant au minimum à des inventaires (Brenière, 1965 ; Vaissayre, 1977 ; Michel et Prudent, 1987 ; Van den Berg *et al.*, 1988 ; Silvie *et al.*, 1989, 1993a ; Michel, 1989, 1992, 1993b, Ekukole, 1993 ; Streito et Nibouche, 1997 ; Silvie *et al.*, 2014). Dans le cas du parasitisme ou des micro-organismes entomopathogènes, elle peut être mesurée et donc, dans une certaine mesure, quantifiée à partir d'échantillons prélevés au champ, puis mis en observation au laboratoire (élevage ponctuel) aux fins de dénombrement et d'identification des ennemis naturels en cause.

Les ennemis naturels par groupes fonctionnels

Les prédateurs

Sur le cotonnier plusieurs groupes d'insectes prédateurs sont communément observés sur des chenilles phyllophages et sur des pucerons respectivement, notamment lorsque leurs proies ou hôtes sont présents en abondance.

Dans le cas des chenilles, la prédation par des punaises des familles des Pentatomidae (sous-famille des Asopinae) (figure 49), des Reduviidae et des Lygaeidae (genre *Geocoris*) (figure 50) est fréquente. Notons que des réduves, connus pour leur régime entomophage, ont été observés s'alimentant occasionnellement sur des plantes (figure 51), phénomène déjà rapporté par Bérenger et Pluot-Sigwalt (1997) ; à l'instar de ce qui a été avancé pour les Miridae, on pourrait donc envisager chez ces insectes l'existence d'un régime alimentaire « double », prenant ici le nom de « phytozoophage ». Toutefois, compte tenu du peu de documentation dans ce domaine et du caractère anecdotique de telles observations, cette hypothèse apparaît prématurée. Le régime alimentaire est variable dans le cas des Reduviidae et des Pentatomidae. Ainsi, outre les chenilles, le prédateur peut s'alimenter d'autres insectes prédateurs (figure 52), de parasitoïdes (figure 53) ou de pollinisateurs (figure 54). L'identification des espèces, qui paraît simple étant donné la taille de ces insectes, peut être compliquée par le dimorphisme sexuel (figure 55).



Figure 49. Punaise Pentatomidae Asopinae et sa proie, l'anthonome du cotonnier (Paraná, Cascavel, janvier 2000)

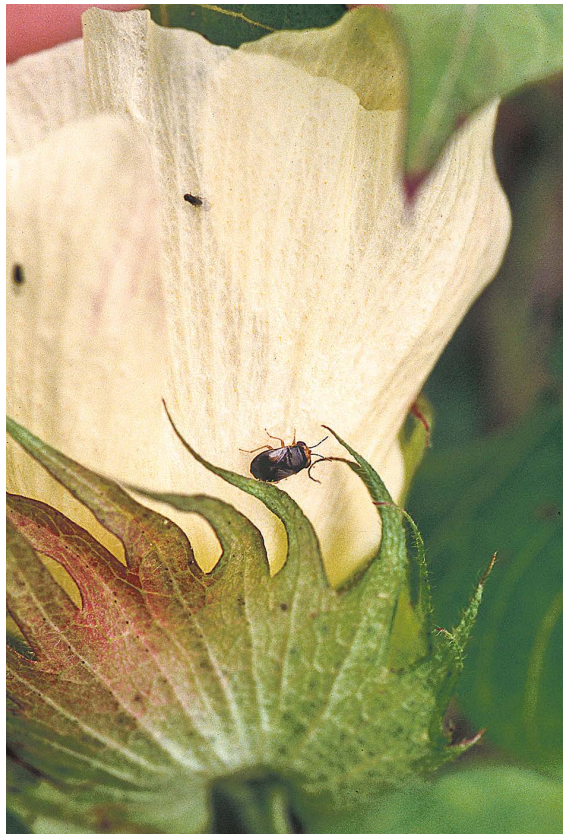


Figure 50. Punaise prédatrice du genre *Geocoris* (Lygaeidae) sur fleur de cotonnier (Togo, Kolokopé, octobre 1989)



Figure 51. Punaise Reduviidae zoophytophage s'alimentant sur grain de mil (Brésil, Mato Grosso, Campo Verde, janvier 2000)



Figure 52. Punaise Pentatomidae Asopinae (*Podisus* sp.) et sa proie, la coccinelle *Naemia* (= *Eriopis*) *connexa* (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, mai 2006)



Figure 53. Punaise Reduviidae (*Zelus longipes*) et sa proie, un hyménoptère parasitoïde, sur épi de *Eleusine corocana* (Poaceae) (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, mars 2007)



Figure 54. Punaise Reduviidae (*Graptocleptes bicolor*) et sa proie, un hyménoptère pollinisateur (Paraguay, Choré, juillet 1999)

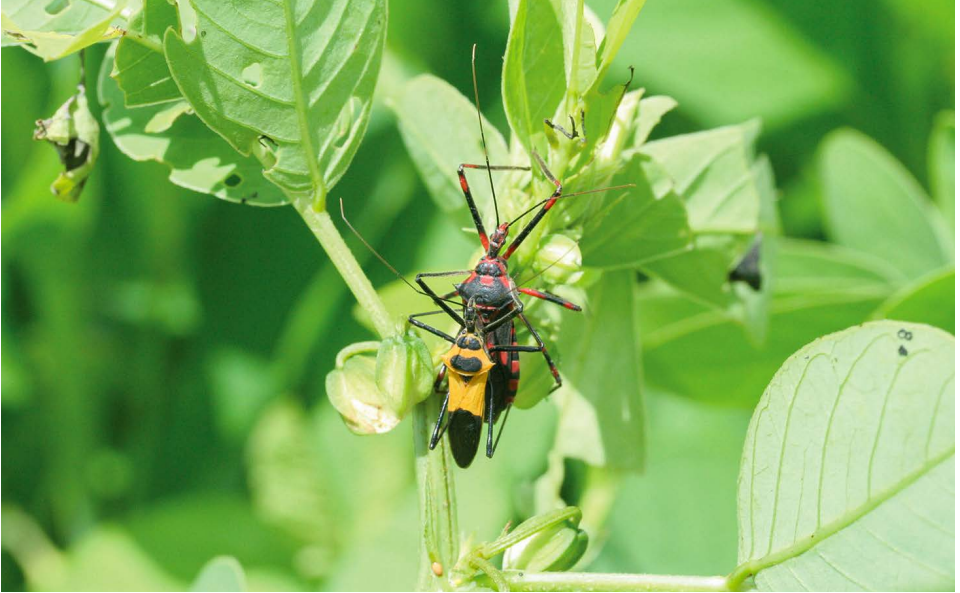


Figure 55. Punaises Reduviidae accouplées (*Zelus armillatus*). Noter le dimorphisme sexuel, avec notamment la différence de taille entre le mâle et la femelle (Brésil, Mato Grosso, fazenda Canãa, décembre 2007)

En présence de fortes pullulations des chenilles, des hyménoptères prédateurs peuvent s'avérer très actifs. Les espèces en cause appartiennent le plus souvent à la famille des Vespidae (figure 56).



Figure 56. Hyménoptère Vespidae (*Polistes [Aphanilopterus] lanio*) prédateur d'une chenille de *Alabama argillacea* (Paraguay, San Isidro, janvier 2005)

Dans le cas des pucerons, il est très aisé de trouver dans une parcelle non traitée par des insecticides des insectes qui s'en alimentent. Les familles concernées appartiennent à différents ordres : Coccinellidae (coléoptères), Chrysopidae et Hemerobiidae (névroptères), Syrphidae et Chamaemyiidae (diptères) (figure 57). Ce sont à chaque fois les larves qui sont aphidiphages, les adultes ne l'étant que dans le seul cas des coccinelles.

La coccinelle asiatique, *Harmonia axyridis* (Pallas) (figure 58), représente un cas particulier. L'espèce est, en effet, emblématique des risques encourus pour cause d'introduction d'un prédateur : originaire d'Asie et libérée dans différents milieux, elle s'est révélée extrêmement néfaste pour la faune auxiliaire autochtone, pouvant notamment s'alimenter d'autres espèces de la même famille des Coccinellidae (Koch, 2003 ; N'óia *et al.*, 2008 ; Pell *et al.*, 2008 ; Martins *et al.*, 2009), ainsi que nous l'avons observé au Paraguay, dans des parcelles de cotonniers ayant subi des attaques de pucerons (Silvie *et al.*, 2014).

Enfin, des scènes insolites impliquant des insectes prédateurs peuvent être occasionnellement observées, comme dans le cas de l'espèce de Reduviidae *Zelus longipes*, dont le mâle surveille la ponte pour repousser les hyménoptères parasitoïdes des œufs (figure 59) ou dans celui de la prédation d'hyménoptères parasitoïdes par des araignées (figure 60). L'influence négative de la prédation entre prédateurs a été signalée dans le cas du puceron *A. gossypii* (Rosenheim et Wilhoit, 1993 ; Rosenheim *et al.*, 1993).



Figure 57. Larve de diptère Chamaemyiidae prédatrice de pucerons du cotonnier (Bénin, Cotonou, septembre 1993)



Figure 58. Adulte de *Harmonia axyridis*, Coccinellidae (Paraguay, San Juan Batista, février 2009)



Figure 59. Punaise Reduviidae (*Rhynocoris albopictus*) mâle surveillant la ponte de la femelle (Togo, Kolokopé, décembre 1991)



Figure 60. Araignée Thomisidae et sa proie, un hyménoptère du genre *Eiphosoma* (Paraguay, Choré, février 2008)

Les punaises à régime phytophage du genre *Dysdercus* sont connues comme pouvant être prédatrices d'autres insectes (figure 61) et même de leur propre espèce, lorsque les individus viennent de muer (figure 62). Plus étonnante est l'attaque d'une larve d'hémérobe sur une chenille de *S. frugiperda* qui, en se retournant, l'a dévorée instantanément (figure 63). Une cohabitation pacifique entre insecte phytophage, prédateur et parasitoïde est parfois observée au champ (figure 64).



Figure 61. Adulte de *Dysdercus* sp., prédateur du coléoptère *Maecolaspis* (Chrysomelidae) sur soja (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, janvier 2004)



Figure 62. Cannibalisme de *Dysdercus* sp. sur un de ses congénères qui vient de muer (Tchad, Bébedjia, décembre 1985)



Figure 63. Chenille de *Spodoptera frugiperda* broyant une larve (agrandissement) d'Hemerobiidae (Brésil, Mato Grosso, novembre 2007)



Figure 64. Présence simultanée d'un prédateur (coccinelle) et d'un parasitoïde (hyménoptère) (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, fazenda Lagoa Encantada, décembre 2006)

Les parasitoïdes

Les chenilles phyllophages et les pucerons sont des ravageurs pour lesquels le parasitisme est facile à observer. Ainsi, il est très aisé de repérer les « momies » de pucerons au sein des colonies aphidiennes.

D'une manière générale, les chenilles phyllophages hébergent une large gamme d'insectes parasitoïdes. En Afrique subsaharienne, la chenille phyllophage *Haritalodes derogata* est l'hôte du complexe de parasitoïdes le plus important numériquement (Silvie, 1990a et 1991b). La même situation se retrouve en Amérique latine avec la chenille de *Alabama argillacea* (Hübner), qui occupe la même niche écologique (Silvie *et al.*, 2009 et 2014).



Figure 65. Œufs de l'hyménoptère parasitoïde *Euplectrus* sp. (Eulophidae) pondus sur chenille de *Alabama argillacea* (Paraguay, Caacupe, mars 2003)



Figure 66. Nymphose des larves de l'hyménoptère *Euplectrus* sp. (Eulophidae) sous le cadavre d'une chenille de *Spodoptera* sp. (Brésil, Primavera do Leste, novembre 2005)

Les parasitoïdes peuvent émerger de façon solitaire ou au contraire de façon grégaire. Des larves d'une espèce du genre *Euplectrus* peuvent ainsi être observées en nombre sur le corps de la chenille (figure 65), cela avant leur nymphose qui prendra place en dessous de ce dernier (figure 66). La polyembryonie peut être observée à travers le corps des chenilles-hôtes dans le cas des espèces du genre *Copidosoma* (figure 67), un phénomène qui donnera naissance à des centaines de parasitoïdes adultes.



Figure 67. Chenille de *Alabama argillacea* parasitée par l'hyménoptère *Copidosoma* sp. (Encyrtidae) (Brésil, Mato Grosso, Gloria do Oeste, juillet 2001)



Figure 68. Cocon de l'hyménoptère *Eiphosoma* sp. (Ichneumonidae) et dépouille de la chenille-hôte, *Alabama argillacea* (Paraguay, Caaguazú, janvier 2004)

Dans le cas des chenilles s'attaquant aux organes fructifères, le parasitisme est plus difficile à observer et à quantifier. Des cocons isolés d'hyménoptères Braconidae ou Ichneumonidae (figure 68) sont souvent rencontrés sur les plants et leur identification est possible à l'émergence de l'adulte. Il n'est toutefois pas possible d'évaluer le taux de parasitisme faute de connaître la population initiale de chenilles.

Certains hyménoptères parasitoïdes s'alimentent sur les nectaires du cotonnier (figure 69). D'autres sont visibles plus facilement en fin de cycle de culture, autour de capsules ouvertes ou sur celles qui sont infestées par le ver rose (*P. gossypiella*) (figure 70).



Figure 69. Hyménoptère Ichneumonidae *Eiphosoma* sp. s'alimentant sur un nectaire de bouton floral (Brésil, Paraná, Palotina, avril 2008)



Figure 70. Hyménoptère Braconidae (*Bracon* sp.) en position de ponte dans une larve endocarpique (*P. gossypiella*) présente dans une capsule verte de cotonnier (Paraguay, Choré, mai 2008)

Au même titre que les insectes phytophages, des insectes prédateurs peuvent être parasités aux stades d'œuf ou de larve (figure 71). Des cas de prélèvements d'hémolymphe (sang des invertébrés) sur les chenilles ont pu être notés de façon anecdotique (figure 72). Ils relèvent en fait de la prédation et non du parasitisme.



Figure 71. Larve de coccinelle parasitée fixée sur une feuille de cotonnier (Brésil, Mato Grosso, Campo Verde, janvier 2003)



Figure 72. Diptère Ceratopogonidae s'alimentant par piqûre sur une chenille de *Alabama argillacea* (Brésil, Mato Grosso, Sinop, mai 2001)

Enfin, des insectes hyperparasitoïdes, parasitoïdes d'espèces parasitoïdes, sont observés dans le cas de certains complexes de parasitoïdes numériquement importants (Silvie *et al.*, 1989 et 1993a; Streito et Nibouche, 1997), ce qui complique les analyses quantitatives.

Les micro-organismes pathogènes

Les micro-organismes pathogènes d'insectes ou d'acariens se rencontrent parmi les virus, les bactéries, les protozoaires, les nématodes et les champignons. Ce sont surtout les chenilles et les pucerons que l'on trouve infectés soit dans les plantations, soit, plus facilement, après la mise en observation d'insectes au laboratoire ou lors des conduites d'élevages en masse. Il importe de souligner que, comme dans le cas des parasitoïdes, l'estimation de l'action des agents pathogènes demande plusieurs jours d'observation. L'observation extemporanée permet, certes, d'estimer le niveau de la population-hôte vivante et celui de la population tuée par l'ennemi naturel, mais elle ignore la partie de la population-hôte en incubation de parasitoïde ou de champignon. Les observations s'appuyant uniquement sur la manifestation visible de l'extérieur (momie de puceron par exemple, ou présence d'une mycose) amènent systématiquement à sous-estimer le rôle de ces auxiliaires. Les symptômes d'une maladie virale chez les chenilles sont les suivants : individus isolés, au corps mou (état frais), et suspendus au support végétal. Il est à souligner que des bactérioses ont rarement été constatées chez des insectes du cotonnier. Une virose a été signalée chez *H. armigera*, dans le cas de chenilles présentes sur la tomate (Bousslama *et al.*, 2020).

Les protozoaires sont souvent détectés dès la mise en élevage de masse des chenilles qui peuvent prendre alors une coloration rosacée.

Les nématodes parasites sont, de manière générale, rarement observés. Ce sont essentiellement des Mermithidae, qui émergent sous la forme d'un filament blanc des corps de chenilles trouvées isolées, en hauteur, sur le végétal.

En milieu aérien ou hypogé, les espèces fongiques pathogènes d'insectes se rencontrent chez les zygomycètes, avec l'ordre des entomophthorales et chez les ascomycètes, sous leur forme « parfaite » (téléomorphe) ou « imparfaite » (anamorphe). Après l'invasion de l'insecte, le champignon fructifie sur le cadavre en donnant le plus souvent un aspect caractéristique.

Pour ce qui est du cotonnier, le champignon entomopathogène le plus remarquable est l'entomophthorale *Neozygites fresenii* (Nowakowski) Remaudière et Keller, espèce connue pour s'attaquer notamment aux espèces du genre *Aphis*. Des épizooties sont ainsi régulièrement constatées dans les populations de *Aphis gossypii* (Steinkraus *et al.*, 1991 et 1995) ou de manière occasionnelle (Silvie et Papierok, 1991; Kuklinski et Borgemeister, 2002). Un autre insecte piqueur-suceur est également touché, il s'agit de l'aleurode *Bemisia tabaci*, qui a été trouvé pour la première fois infecté par un champignon entomopathogène du même groupe taxinomique, au Tchad (Silvie et Papierok, 1991).

Ce sont les adultes qui meurent de l'infection fongique, les cadavres fixés à la face inférieure des feuilles étant repérables en raison de leur position en ailes écartées (figure 73). Le champignon, une espèce du genre *Zoophthora*, a été retrouvé en Guinée, où il provoque des épizooties dans les populations-hôtes (Jean-Louis Dumas et Bernard Papierok, données non publiées).



Figure 73. Aleurodes *Bemisia tabaci* morts de mycose (ailes écartées) (Brésil, Paraná, Palotina, mai 2002)

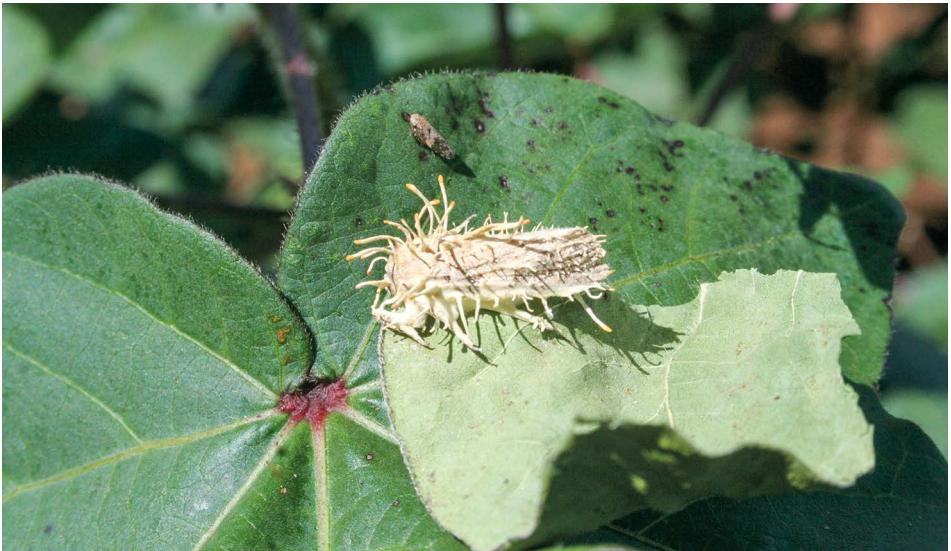


Figure 74. Adulte de *Spodoptera frugiperda* mort de mycose par *Akanthomyces* sp. (Brésil, Mato Grosso, Nova Mutum, juin 2009)



Figure 75. Adulte de l'anthonome mort de mycose par *Beauveria* sp. (Brésil, Mato Grosso, Campo Verde, 2022). Crédit photo : Guilherme Gomes Rolim.



Figure 76. Chenille de *Chrysodeixis includens* morte de mycose par *Metarhizium* (= *Nomuraea*) *rileyi* (Brésil, Mato Grosso, Campo Verde, février 2005)

À côté de ces rares espèces à manifestations épizootiques récurrentes, la présence d'autres champignons entomopathogènes est observée dans les populations d'arthropodes ravageurs du cotonnier, mais d'une manière essentiellement enzootique. Il ne s'agit alors pas d'entomophthorales. Cette présence peut se manifester de manière isolée, ainsi que nous l'avons observée à deux reprises, au Brésil, sur un adulte de *Spodoptera frugiperda*, l'un colonisé probablement par *Akanthomyces* sp. (anamorphe), l'autre présentant un début de fructification d'un ascomycète (figure 74). Toutefois, nous n'avons pas eu l'opportunité de rencontrer le champignon *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin sur l'anthonome du cotonnier, champignon pourtant signalé sur ce ravageur en Amérique, notamment au Brésil (figure 75) (Camargo *et al.*, 1984).

Des mycoses dues à *Metarhizium rileyi* (Farl.) Kepler, Rehner et Humber (plus connu dans la littérature sous le nom de *Nomuraea rileyi* Farl.) ont été plus ou moins régulièrement constatées au Brésil sur des chenilles de *Alabama argillacea*. Le cadavre se recouvre d'un feutrage mycélien d'une couleur blanche (figure 76) qui vire progressivement au vert clair, couleur de la sporée (figure 77). La singularité de la situation est à souligner, d'autant qu'elle a été observée à plusieurs reprises. Le cadavre a été aperçu « à vue » sur un jeune plant dans une culture intensive sur grande surface (figures 78 et 79). Un examen détaillé des alentours immédiats ne conduit pas nécessairement à la mise en évidence d'autres chenilles mortes de mycose. Cela montre que même dans un environnement « homogène », sous un couvert végétal restreint et donc permettant une forte insolation, un champignon entomopathogène, micro-organisme pourtant tributaire d'une certaine humidité, peut se manifester.



Figure 77. Chenille de *Alabama argillacea* morte de mycose par *Metarhizium* (= *Nomuraea*) *rileyi* (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, mai 2000)

3. La régulation naturelle par les arthropodes et par les micro-organismes

Le monde des champignons entomopathogènes reste encore mal exploré et des découvertes y sont possibles même sur des espèces de ravageurs bien connues. Ainsi, au Bénin, une épizootie due très probablement à une entomophthorale a été observée sur les cicadelles *Amrasca biguttula biguttula* présentes sur *Abelmoschus esculentus* (Silvie *et al.*, 2023b).



Figure 78.
Rangée de cotonniers avec une chenille de *A. argillacea* morte de mycose (au premier plan) (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, avril 2003)



Figure 79. Rangée de cotonniers avec une chenille de *A. argillacea* morte de mycose (gros plan) (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, avril 2003)

Importance globale du complexe d'ennemis naturels

La limitation naturelle des populations de ravageurs par leurs antagonistes est très variable selon les situations. Des taux remarquablement élevés de parasitisme ou d'infection microbienne peuvent être constatés, mais cette régulation naturelle intervient le plus souvent trop tard, quand l'agresseur a déjà causé des dégâts significatifs. De fait, les traitements appliqués afin de prévenir des pertes de production non supportables par le producteur l'auront été avant la manifestation effective et visible des auxiliaires.

Les situations sont toutefois variables en fonction de la conduite de la culture. Ainsi, dans le cas de la ferme de multiplication de semences de Golondrina, au Paraguay, le taux de parasitisme des pucerons en fin de cycle cultural était quasiment de 100 %, résultat d'une réduction du nombre d'interventions chimiques.

Le cas du champignon *N. fresenii* est intéressant à considérer. Sa fréquence et ses capacités épizootiques en font un agent biologique potentiel, mais, à ce jour, il n'a pas été possible de le cultiver *in vitro* aux fins d'une production de masse. Cette entomophthorale a ainsi fait l'objet de nombreuses recherches appliquées, aux États-Unis (Steinkraus *et al.*, 1993, 1996 et 1999; Steinkraus et Slaymaker, 1994; Steinkraus et Boys, 2005), dans l'optique de mettre au point des outils d'aide à la décision pour la réalisation éventuelle d'un traitement en fonction du taux de mycose.

Chapitre 4

Les pertes de production liées à la diversité des arthropodes

Les différents dégâts causés au cotonnier par les divers arthropodes qui s'en alimentent entraînent des pertes de production qui se manifestent à la fois au niveau de la quantité de coton-graine produite et de la qualité des fibres.

Les pertes quantitatives

L'estimation des pertes quantitatives, qu'elles soient totales ou qu'elles résultent d'un groupe de ravageurs donné revêt des aspects fort différents. Aux États-Unis, ces pertes peuvent être chiffrées globalement, au dire d'agriculteurs ou de consultants, comme cela est pratiqué et régulièrement mentionné dans les actes des conférences cotonnières annuelles (Beltwide Cotton Conferences).

La mise en place comparative de parcelles de cotonniers ne recevant aucun traitement et de parcelles en recevant est pourtant un moyen d'évaluation annuelle des pertes quantitatives résultant de la pression des ravageurs, cette dernière étant exprimée en matière d'abondance des populations d'arthropodes et de celle des maladies intervenant dans une localité. Une telle démarche est aisée dans des stations de recherche, mais plus difficile à mettre en pratique chez des producteurs, même avec une indemnisation possible.

Toutefois, ce procédé n'est pas systématiquement applicable aux arthropodes s'attaquant aux organes fructifères. Il n'est pas toujours possible, en effet, de disposer, en fin de cycle cultural, de capsules vertes ou mûres dans le cas où les dégâts subis antérieurement ont détruit les plants.

Comparativement à la méthode que l'on peut considérer comme empirique des producteurs nord-américains, un dispositif simple, non statistique, a été mis en place en Afrique francophone. Il comprend des parcelles (six, le plus souvent) disposées de façon linéaire, implantées chaque année dans diverses localités d'un même pays, et faisant l'objet d'une protection dite « à trois niveaux ». Ces trois niveaux sont les suivants : aucune protection (témoin non traité), protection recommandée¹¹ par la recherche nationale aux producteurs, et surprotection (une application chaque semaine qui commence au trentième jour après le semis).

¹¹ Les recommandations faites sont issues des travaux des instituts de recherche nationaux, elles s'adressent à tous les acteurs qui encadrent la culture cotonnière. Le programme comprend cinq à six applications espacées de quatorze jours, la première commençant au 45^e jour après le semis.

La présence des parcelles non traitées, situées aux extrémités du dispositif, permet de suivre la dynamique « naturelle » de population des ravageurs et des maladies (Silvie, 1991a), cependant que la comparaison entre parcelles conduit à relier les rendements obtenus, et donc les pertes potentielles, aux trois niveaux de protection.

La mise en place de tels dispositifs au champ, à la fois en de nombreuses localités et dans la durée, est un défi. En Afrique francophone, cette stratégie a pu être appliquée systématiquement dans plusieurs pays (Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Mali, Sénégal, Tchad, Togo) et de nombreuses années durant. Elle a permis de mesurer les variations annuelles de pressions des ravageurs ou des maladies selon les pays et les localités, ainsi que de quantifier les pourcentages de pertes de production de coton-graine.

Les pertes mesurées avec le dispositif multilocal des parcelles à trois niveaux de protection se sont révélées variables selon le pays, la région, ou la campagne agricole (Cadou, 1982; Nibouche et Gozé, 1993, Renou *et al.*, 1993). Elles ont même pu dépasser un niveau de 50% (Silvie et Gozé, 1991). Dans le cas du Tchad, les résultats obtenus n'ont pas permis d'établir une corrélation entre les niveaux annuels de populations de chenilles estimés grâce au cumul des comptages et les pertes de production (Silvie et Gozé, 1991). Cela reflète la capacité de compensation du cotonnier qui peut récupérer des pertes de boutons floraux provoquées par les ravageurs agissant en début de cycle cultural.

Cette capacité de compensation peut expliquer l'absence de différence statistiquement significative des rendements de coton-graine dans les dispositifs de parcelles dites « filtres » mises en place au Togo en 1988 et 1989. Les traitements insecticides étaient alors effectués avec un pyrèthrine, la cyperméthrine, matière active destinée à contrôler les lépidoptères, ou avec des organophosphorés (diméthoate, dicofol) visant préférentiellement les insectes piqueurs-suceurs ou les acariens (Pierre Silvie, résultats non publiés).

Le dispositif de parcelles à trois niveaux n'a pu être mis en place au Brésil car les producteurs n'y acceptent pas une non-protection totale des cotonniers, même sur de petites parcelles. Ils les considèrent en effet comme des lieux de survie et de multiplication du ravageur en expansion qu'est l'anthonome, *A. grandis*.

Les pertes qualitatives

La qualité d'une production cotonnière repose sur les caractéristiques technologiques de la fibre (indice micronaire bas, longueur de la soie, ténacité, résistance), qui sont un élément essentiel pour l'industrie et qui interviennent dans le classement utilisé dans le marché mondial.

Il s'agit donc d'un élément très important pour le producteur, car il conditionne le prix payé à ce dernier au moment de l'achat du coton-graine au champ. Notons à ce propos que dans les pays africains la fibre est le plus souvent exportée; elle représente alors un gain appréciable au niveau national.

Les pertes qualitatives sont liées à l'aspect visuel de la fibre, qui peut être dépréciée en raison de la présence de dépôts de miellats d'insectes piqueurs-suceurs, ce qui provoque un collage, ou encore de taches dues aux excréments de punaises qui entraînent un jaunissement de la fibre. En outre, une dépréciation des caractères technologiques de la fibre peut résulter d'une plus faible maturité de la fibre provoquée par des perturbations physiologiques pouvant être occasionnées par certains ravageurs (cicadelles, par exemple).

Partie 2

Stratégies et pratiques de gestion des ravageurs du cotonnier

Les stratégies et les pratiques en matière de protection du cotonnier contre les arthropodes sont ici présentées et discutées en privilégiant la comparaison entre l'Afrique subsaharienne et l'Amérique du Sud, comparaison complétée par un élargissement au niveau mondial. Une attention particulière est ainsi accordée d'une part, aux stratégies fondées en Afrique sur une utilisation réduite des insecticides chimiques et d'autre part, à celles excluant ces composés (coton biologique). S'appuyant sur l'analyse des succès et des échecs de ces pratiques, les auteurs discutent ensuite d'une approche de gestion des ravageurs qui tient compte de l'ensemble des composantes de l'agroécosystème et l'élargissent en intégrant le paysage considéré dans sa globalité fonctionnelle. Enfin, l'importance de la participation des acteurs des territoires concernés est soulignée ; sans ces derniers, en effet, aucune innovation, quelle que soit son efficacité, ne saurait être aisément adoptée.

Chapitre 5

Évolution des stratégies en protection des végétaux

Pour le cotonnier comme pour toute plante cultivée, prévenir les pertes de rendement et de qualité liées aux dégâts d'arthropodes, voire d'autres invertébrés ou de vertébrés, ainsi qu'aux maladies est une nécessité économique. L'éventail des moyens mis au fur et à mesure à disposition pour lutter contre les bioagresseurs est remarquablement large et diversifié, résultat d'un continuum de progrès scientifiques et techniques, de processus d'analyse des causes des succès mais aussi des échecs survenus sur le terrain, de prises de conscience, d'évolution des idées et des esprits. Ce continuum est jalonné par des étapes majeures. On peut citer, ainsi, la commercialisation des premiers insecticides de synthèse, la prise de conscience face à l'abus des produits chimiques et à leurs conséquences néfastes, ou la mise sur le marché des premières variétés transgéniques résistantes à certains déprédateurs.

Les différentes méthodes utilisées en culture du cotonnier sont présentées et discutées dans la seconde partie de cet ouvrage. En préambule à un texte nécessairement à dominante technique, il nous a paru utile d'exposer dans les pages qui suivent les principales approches survenues dans la lutte contre les ravageurs et pour la protection de la culture, telles qu'elles sont formalisées sous la forme de concepts dans la littérature. Ces stratégies sont nommées sous leur vocable consacré, à la fois en langue française et en langue anglaise. Leur application à la culture du cotonnier est mentionnée lorsque des exemples sont rapportés dans la littérature. En outre, il convient de mentionner l'apparition récente, en relation avec l'influence des médias, de termes construits avec le préfixe bio, comme biofertilisants, biostimulants¹², agents de biocontrôle, « biopesticides », etc.

¹² La différence entre les termes « biofertilisant » et « biostimulant » n'est pas toujours marquée et la Commission européenne, dans son règlement UE n° 2019/1009, a placé les biostimulants dans la catégorie des fertilisants. Les biofertilisants sont constitués de matières en décomposition de type compost, litière de parc, fumiers. Une définition des biostimulants est donnée dans Yakhin *et al.* (2017) : « *Produit formulé d'origine biologique qui améliore la productivité des plantes en raison des propriétés nouvelles ou émergentes du complexe de constituants, et non en conséquence de la présence d'éléments nutritifs essentiels connus pour les plantes, de régulateurs de croissance des plantes ou de composés protecteurs des plantes* » (traduction des coordinateurs).

Lutte intégrée et gestion à large échelle géographique

Depuis la mise sur le marché des premiers insecticides de synthèse, la lutte intégrée contre les ravageurs et les maladies est probablement la plus connue des approches développées en matière de protection des plantes.

Dès les années 1950, avant même l'apparition avérée de phénomènes de résistance des insectes aux insecticides, les entomologistes s'étaient préoccupés des conséquences néfastes de l'utilisation systématique et à grande échelle de ces produits chimiques et de la nécessité de réduire leur utilisation et de recourir à l'emploi de méthodes complémentaires.

À l'échelle du grand public, le livre célèbre de Rachel Carson (1962), *Silent Spring*, faisait date en tentant d'alerter le plus grand nombre sur ces questions.

Parmi les méthodes possibles, la lutte biologique classique, par introduction d'un ou de plusieurs ennemis naturels dans une population de ravageur exotique, fait alors l'objet d'une attention soutenue, en raison de résultats significatifs obtenus en Californie dès les années 1930 dans le contrôle des cochenilles sur *Citrus* (Smith et Armitage, 1931; Smith et Compere, 1931). Plus récemment, Pickett *et al.* (2007) se sont intéressés aux parasitoïdes des punaises du genre *Lygus*. En Europe était ainsi créée la Commission internationale de lutte biologique contre les ennemis des cultures, devenue depuis l'Organisation internationale de lutte biologique. En France, l'Inra développait dans ce sens des structures spécialisées, comme la station de zoologie agricole d'Antibes ou le laboratoire de lutte biologique de La Minière.

La lutte biologique *sensu stricto* n'est cependant qu'un moyen parmi d'autres pour tenter de réduire l'utilisation des produits chimiques. La nécessité d'une approche élargie de la protection des cultures était patente. C'est dans ce contexte qu'en 1959 Stern *et al.* ont formulé le concept de protection intégrée (*integrated pest management*, IPM), qui s'appuie sur la combinaison de méthodes et la définition de seuils.

Par « lutte intégrée », on entend en effet l'emploi combiné et harmonieux de toutes les techniques appropriées visant à augmenter la spécificité et à réduire le nombre des interventions chimiques afin de maintenir les populations de ravageurs et conséquemment leurs dégâts en dessous du seuil de tolérance que peut supporter la culture sans dommage économique.

Dans la pratique, un seuil d'intervention est généralement défini par un niveau de dégâts ou de populations d'une espèce de ravageur à partir duquel il est donc considéré économiquement nécessaire d'intervenir au moyen d'un traitement insecticide, par exemple. Les niveaux de seuils adoptés résultent de l'observation préalable, au champ, des populations d'un ou de plusieurs ravageurs ou de leurs dégâts (pourcentage de plants attaqués, par exemple).

Historiquement, la protection intégrée des cultures (PIC) a fait l'objet, à partir de 1970, de programmes d'application à différentes cultures, financés par diverses institutions comme la FAO, l'ONU ou la Banque mondiale (Kogan, 1998; Dhawan et Peshin, 2009; Peshin *et al.*, 2009; Van Huis, 2009). Très rapidement,

la culture cotonnière et le riz ont été les principales plantes concernées par cette approche (Reynolds *et al.*, 1975 ; Morse et Buhler, 1997a).

Dès 1977, Bottrell et Adkisson font état d'une bibliographie importante sur les diverses méthodes de protection du cotonnier et dans laquelle les seules références à l'Afrique sont les ouvrages de Pearson et Maxwell-Darling (1958) et de Ripper et George (1965).

Par la suite, des études et des revues réalisées sur différents continents ne mentionnent pas les expériences conduites en Afrique (Fitt, 1994 ; Luttrell, 1994 ; Luttrell *et al.*, 1994 ; Ramalho, 1994 ; Sugonyaev, 1994 ; Fitt *et al.*, 2009 ; Naranjo et Luttrell, 2009 ; Naranjo et Ellsworth, 2010). Quant à l'ouvrage édité en 2010 par Wakelyn et Chaudhry, il propose un chapitre sur les perspectives de protection intégrée du cotonnier uniquement en Inde, en Turquie, en Chine, en Australie et aux États-Unis.

En dépit de ces constatations, il est intéressant de souligner que les diverses modalités de la mise en place d'une protection intégrée sur le continent africain avaient pourtant été considérées dans les différentes contributions, et ce dès les années 1980 (Frisbie *et al.*, 1989 ; Green et De B. Lyon, 1989 ; Matthews et Tunstall, 1994 ; Abate *et al.*, 2000). De leur côté, De B. Lyon (1994) ainsi que Hillocks (1995) évoquent bien les travaux menés en Afrique de l'Ouest dans ce domaine. Enfin, l'ouvrage plus récent de Kranthi et Russell (2009) comporte un chapitre sur la situation de la protection du cotonnier en Afrique.

D'une manière intéressante, Ferron et Deguine (2005a et 2005b), puis Deguine *et al.* (2008) et Deguine et Ferron (2008) ont proposé un parcours historique de la stratégie de lutte intégrée en se référant à la culture cotonnière comme cas d'étude. Certains de leurs textes, accessibles en langue française, favorisent ainsi une diffusion de cette stratégie auprès des pays francophones d'Afrique.

Les méthodes composant la protection intégrée

Avec la stratégie de protection intégrée (IPM), il s'agit de rechercher des effets complémentaires, voire une synergie, entre les différentes méthodes de contrôle disponibles : lutte mécanique, physique et culturale, emploi de variétés résistantes (dont les variétés transgéniques), lutte chimique conventionnelle, lutte biologique (par conservation, introduction, inoculation, inondation ou lâcher de masse), lutte autocide (utilisation de mâles stériles, par exemple), emploi d'insecticides biologiques, phéromones, régulateurs de croissance d'insectes (IGR).

Cette approche globale a été progressivement affinée, avec la prise en compte de méthodes législatives, du suivi des populations de ravageurs (détection, échantillonnage), des seuils de traitement et de la gestion de la résistance aux insecticides. Le lecteur intéressé trouvera dans la littérature des schémas détaillés permettant d'avoir une vue complète des différentes composantes de la protection intégrée (Naranjo, 2001 ; Ellsworth et Martinez-Carrillo, 2001 ; Luo *et al.*, 2014 ; Stenberg, 2017 ; Yadav *et al.*, 2022).

La stratégie d'IPM continue à faire l'objet de nombreux travaux et discussions, et cela à diverses fins :

- poursuivre sa promotion (Hillocks et Russell, 2014 ; Kogan et Higley, 2019 ; Kogan et Heinrichs, 2020 ; Lamichhane *et al.*, 2015, 2016 et 2018) et faciliter sa diffusion (Tonle *et al.*, 2024) ;
- proposer, à la suite de Naranjo (2001), des modèles plus ou moins complexes de représentation des composantes de l'IPM, qui auraient ainsi pour vocation de constituer de véritables instruments d'aide à la décision (Ellsworth et Martinez-Carrillo, 2001 ; Naranjo et Ellsworth, 2009 ; Naranjo et Luttrell, 2009 ; Greenberg *et al.*, 2012 ; Gliessman *et al.*, 2022) ;
- souligner les contraintes liées à son adoption et à sa mise en œuvre (Parsa *et al.*, 2014 ; Bottrell et Schoenly, 2018) ;
- s'interroger sur sa faisabilité chez de petits agriculteurs qui ont, de leur côté, déjà développé leurs propres combinaisons de méthodes (Van Huis et Meerman, 1997 ; Morse et Buhler, 1997b ; Orr et Ritchie, 2004) ;
- l'actualiser ou l'analyser, en lien ou non avec l'adoption des variétés génétiquement modifiées (Hillocks, 2005 ; Wilson *et al.*, 2013 et 2018 ; Peshin *et al.*, 2014 ; Pretty et Bharucha, 2015) ou avec le changement climatique (Gvozdenac *et al.*, 2023) ;
- constater son échec ou ses lacunes (Horne *et al.*, 2008 ; Deguine *et al.*, 2021 ; Tamò *et al.*, 2022).

Dans le contexte de la réglementation en vigueur dans l'Union européenne, Matyjaszyk (2019) souligne bien les problèmes ou les défis liés à l'application obligatoire de cette stratégie : risque de résistance des bioagresseurs aux pesticides (herbicides, notamment) en cas de réduction de doses, manque de définition de seuils économiques d'intervention, nombre limité de produits d'origine biologique, manque de diversité de modes d'action des pesticides dans certains cas, traitements préventifs dans le cas des semences, manque de connaissances par les utilisateurs. Des difficultés liées à des aspects économiques sont également mentionnées dans le cas de la mise en œuvre de pratiques comme l'augmentation de la biodiversité ou la rotation des cultures. Les mêmes limitations pourront être retrouvées en zones tropicales.

La gestion à large échelle géographique

Apparaissant souvent limitée à l'échelle du champ cultivé, la protection intégrée ne tient pas compte du fait que le cycle de développement de certains ravageurs comporte une, voire plusieurs phases de déplacement à longue distance. Pour tenir compte des mouvements entre les régions ou à l'intérieur d'un pays, le concept a donc été élargi à celui de la gestion à large échelle géographique, en anglais *area-wide control*, *area-wide pest management* ou *area-wide integrated pest management* (AW-IPM).

En matière de culture cotonnière, les insectes concernés sont un coléoptère, l'anthonome du cotonnier (*A. grandis*) (Smith, 1998 ; Cunningham et Grefenstette, 2000 ;

Allen, 2008), deux lépidoptères, *P. gossypiella* (Henneberry, 2007), *H. armigera* en Chine (Wu, 2007), et un hémiptère, *Bemisia tabaci* (Brewer et Goodell, 2012). Dans le cas de l'anthonome du cotonnier, cette approche a été développée principalement aux États-Unis dans une optique d'éradication (El-Lissy et Grefenstette, 2007) ou de suivi des populations de ce ravageur majeur, avec la mise en place de nombreux pièges à phéromone (figure 80). Il est à remarquer que l'éradication de ce coléoptère avait été recherchée de cette manière dès 1982, au Nicaragua (Swezey et Daxl, 1988).

Dans le cas de *P. gossypiella*, l'approche de gestion des populations à large échelle a fait intervenir la technique de l'insecte stérile (Walters *et al.*, 2000) ainsi que des lâchers d'insectes transgéniques (Simmons *et al.*, 2007).

Avec *B. tabaci*, le but était la gestion de sa résistance aux insecticides utilisés.

Dans le cas de *H. armigera*, en Chine, le suivi des populations migrantes de lépidoptères est réalisé avec un réseau de pièges lumineux (figure 81).

En Afrique du Sud, un autre lépidoptère connu sur le cotonnier, *T. leucotreta*, a fait également l'objet d'une gestion de ce type, non pas sur cette plante, mais dans les cultures d'agrumes dont il est un ravageur économiquement important (Carpenter *et al.*, 2007).



Figure 80. Piège à phéromone pour la capture de *Anthonomus grandis* (Paraguay, Coronel Bogado, janvier 1999)



Figure 81. Piège lumineux pour la capture de lépidoptères dont *Helicoverpa armigera* en Chine (Hebei, août 2015)

Comme le rappelle Faust (2008), l'approche à large échelle (*area-wide pest management*) inclut des pratiques qui sont des composantes de l'IPM telles que la lutte biologique, la résistance des plantes-hôtes, les pratiques culturales et les luttues physique ou chimique. La grande différence entre les deux approches est la nature volontariste de l'IPM, tandis que la seconde, AW-IPM, qui demande une organisation participative, implique le plus souvent l'exercice d'une contrainte sur les agriculteurs, notamment dans le cas de programmes d'éradication d'un ravageur.

De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable

Réduire l'usage des insecticides suppose implicitement que les agriculteurs disposent d'autres méthodes de lutte et adoptent, en fin de compte, de nouvelles pratiques. En matière de changement de pratiques, deux types d'approches sont généralement distingués : les changements de rupture et les changements « pas à pas » (*incremental*, en anglais). La première situation correspond à l'application d'un système de culture totalement nouveau, comme celui de l'agriculture biologique, avec l'arrêt de l'emploi d'insecticides de synthèse, un renforcement des processus écologiques de prédation, de parasitisme, d'allélopathie, de pollinisation, éventuellement un cahier des charges établissant des règles strictes dont l'application est vérifiée par des organismes de certification, sans oublier les défis sociaux et institutionnels qu'induit la mise en place d'une pratique nouvelle.

Un changement pas à pas n'est pas drastique. Il correspond à une étape de transition entre ce qui était et ce qui sera à la suite de l'application des nouvelles pratiques proposées. C'est de cette manière que l'on peut considérer, notamment, le passage de l'agriculture dite « conventionnelle » à une agriculture appelée « durable » ou davantage « soutenable » (pour *sustainable*), marquée par la réduction progressive des insecticides, voire *in fine* par leur élimination totale. Cette démarche s'est vue qualifiée de « stratégie ESR », un terme initialement introduit par Hill et MacRae (1995), et qui fait intervenir trois étapes, E pour *efficiency* (efficacité), S pour *substitution* et R pour *redesign* (reconception du système).

Ces étapes ont été détaillées par Pretty (2018) pour le passage de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture durable. La première étape consiste en la réduction de la consommation des ressources rares et chères et de leurs pertes, un usage rationnel des intrants (engrais, insecticides), importés ou présents localement et appliqués à des doses appropriées aux bons moments. Cette étape inclut également la surveillance et l'observation (*scouting*) des ravageurs ainsi que l'évitement des pertes post-récolte. La deuxième étape vise à utiliser des ressources locales moins dégradantes pour l'environnement, la régulation biologique, par exemple, avec des lâchers d'ennemis naturels. L'emploi de nouvelles variétés, tolérantes à la sécheresse ou résistantes à certains ravageurs et maladies est un autre exemple. La substitution des intrants chimiques de synthèse est recherchée. Pretty (2018) place également les méthodes de protection liées à l'ARN (voir chapitre 10) dans cette seconde étape.

La troisième étape (reconception) correspond à un changement qui peut s'affranchir des étapes antérieures : passage de l'IPM à l'agriculture biologique, aux pratiques de l'agriculture de conservation, à la rizipisciculture, à l'agroforesterie, tous changements impliquant des défis sociétaux et institutionnels. Pour cette dernière étape, une méta-analyse a été réalisée à partir de quatre cents projets portant sur l'« intensification soutenable » (*sustainable intensification*, en anglais) (Pretty, 2018 ; Pretty *et al.*, 2018).

Cette stratégie en trois étapes ESR a été discutée. En 1999, faisant un rapprochement entre la stratégie ESR de l'IPM dans le cas de la gestion des insectes des fruits, Hill *et al.* (1999) avaient souligné que les étapes E et S sont de nature curative, tandis que l'étape R est de nature préventive, une interprétation reprise par Hill (2014). De leur côté, Doré et Belon (2019) puis Gliessmann *et al.* (2022) ont considéré qu'il n'était pas indispensable que les trois étapes se suivent dans l'ordre mentionné initialement.

Estimant que les trois niveaux E, S et R décrivent des changements à l'échelle de l'exploitation seulement, Gliessman (2015 ; 2016a ; 2016b) a défini deux étapes supplémentaires afin de prendre en compte non seulement la chaîne alimentaire, mais plus généralement l'ensemble de la société. Son quatrième niveau établit ainsi le lien entre les producteurs et les consommateurs, à travers des marchés particuliers, des échanges directs, des coopératives de consommateurs, éléments qui raccourcissent la chaîne alimentaire cependant que le niveau 5 élargit la démarche vers des aspects relevant de l'éthique, par exemple. Ces deux derniers niveaux, repris par Wezel *et al.* (2020), ont été plus récemment détaillés par Gliessman *et al.* (2022), ces auteurs mettant l'accent sur les aspects liés aux collectivités humaines, aspects énoncés dès 1995 par Hill et MacRae (1995) (aspects repris en anglais sous les termes *psychological laws*).

Lutte biologique et biocontrôle

Dans son acception initiale, la lutte biologique est l'utilisation d'organismes vivants, essentiellement des insectes, dans la lutte contre les ravageurs soit par acclimatation d'insectes importés puis par libération et établissement, soit par augmentation ou inondation. S'y est ajoutée ensuite la lutte biologique par conservation (*conservation biological control*), ayant pour but le maintien et éventuellement le renforcement des ennemis naturels (Bugg et Pickett, 1998 ; Vargas *et al.*, 2023). Le terme « biocontrôle » provient de la traduction française du vocable *biocontrol*, contraction de *biological control*, lutte biologique *sensu stricto*, en anglais. Défini dans le Code rural et de la pêche maritime de 2016, le terme « biocontrôle » bénéficie d'une définition stable et normative (Fauvergue *et al.*, 2020). Le lecteur intéressé trouvera chez Deguine et Ledouble (2022), de façon détaillée, l'origine du concept, en France, son étendue et son instabilité sémantiques ainsi que l'évolution récente de son usage. En pratique, le biocontrôle inclut l'emploi d'agents ou de produits spécifiques, dits « de biocontrôle », qui appartiennent à quatre groupes : les macro-organismes, les micro-organismes, les médiateurs chimiques et les substances naturelles d'origine minérale, animale et végétale.

Parmi les macro-organismes se trouvent les prédateurs et les parasitoïdes des insectes ravageurs : des arthropodes majoritairement (coccinelles, chrysopes, punaises prédatrices, des hyménoptères des familles des Braconidae ou des Ichneumonidae), mais également des nématodes. Les micro-organismes sont représentés par les bactéries, les champignons, les virus entomopathogènes, tandis que les phéromones appartiennent au troisième groupe et les extraits végétaux au quatrième.

L'emploi de ces organismes, par acclimatation d'insectes importés puis par libération et établissement, ou par augmentation ou inondation, correspond en fait à la lutte biologique classique. Il s'agit d'une application relativement stricte du terme « biocontrôle », dont le réseau d'étude des effets non intentionnels du biocontrôle, coordonné par l'INRAE (dans le cadre du métaprogramme SumCrop), a élargi l'acceptation en lui incluant des pratiques comme la lutte biologique par conservation. Cette approche élargie du biocontrôle, englobant d'autres pratiques, rejoint celle proposée par Bernard (2017) et l'Académie d'agriculture de France.

Agroécologie et protection agroécologique des cultures

Lutte intégrée, approche ESR, gestion à large échelle géographique... voilà des approches successives qui s'appuient, à chaque fois, sur des analyses et sur une prise en compte de plus en plus large des facteurs et des éléments de tout ordre intervenant au niveau d'une culture ou d'un système de cultures donnés.

Aujourd'hui, la poursuite des réflexions sur ces questions se concrétise par la promotion du concept de l'agroécologie. Ce terme, dont le sens est non totalement stabilisé (à ce propos, Reteau [2016] parle même d'une « agroécologie schizophrénique ») et dont l'historique et les protagonistes ont été mentionnés dans l'ouvrage didactique de Doré et Bellon (2019) recouvre selon Wezel *et al.* (2009) trois dimensions : une discipline scientifique, un ensemble de pratiques et un mouvement social (notamment en Amérique du Sud). La poursuite de l'analyse des pratiques agroécologiques a conduit Wezel *et al.* (2014) à les répartir dans quinze catégories suivant la grille d'analyse ou de lecture prenant en compte les trois étapes de la stratégie ESR (voir section « De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable », chapitre 5), puis à définir treize principes (Wezel *et al.*, 2020). Parmi ces pratiques, on peut en relever certaines qui font référence à des pratiques culturelles, comme les associations de cultures (*intercropping*), la lutte biologique, l'usage d'extraits botaniques, l'intégration d'éléments de paysage dont les effets sur les populations de ravageurs sont avérés ou au moins étudiés. Certaines de ces pratiques recourent donc des composantes de l'IPM vues dans la section « Lutte intégrée et gestion à large échelle géographique » (chapitre 5).

Dans une approche agroécologique globale, la protection des cultures se doit d'être également globale, en prenant en considération à la fois toutes les connaissances correspondantes, toutes les méthodes et les techniques disponibles et tous les acteurs concernés. L'approche de protection agroécologique des cultures (PAEC) a

été ainsi définie (Deguine *et al.*, 2016) ; elle repose sur « un raisonnement écologique en vue d'un fonctionnement durable des agroécosystèmes » étant entendu que « la santé du sol et la biodiversité de l'agroécosystème sont les deux axes directeurs de la PAEC et les trois principaux piliers sont les mesures préventives, la lutte biologique et la gestion des habitats » (Deguine *et al.*, 2020). Il convient de souligner que, suivant Aubertot *et al.* (2016), « la PAEC ne s'oppose pas à la protection intégrée des cultures (PIC) », mais que « au contraire, ces deux notions doivent être vues comme complémentaires » puisque « le terme PAEC se rapporte aux connaissances à mobiliser, celui de PIC aux opérations à effectuer et à leur combinaison... ». Notons, à regret, que le mot *cotton* n'est pas mentionné dans la publication la plus récente sur le sujet (Deguine *et al.*, 2023). Bien plus, il n'en est question qu'une seule fois dans la publication de Côte *et al.* (2022) faisant état des actions à promouvoir pour la transition agroécologique de l'agriculture tropicale. Enfin, la notion d'agriculture régénératrice (*regenerative agriculture*), de plus en plus adoptée dans les médias, n'est pas présentée dans cet ouvrage, car elle relève de pratiques concernant principalement le compartiment « sol » du système de culture (Schreefel *et al.*, 2020 ; Soto *et al.*, 2020 ; Giller *et al.*, 2021 ; Giller, 2022 ; Duru *et al.*, 2022 ; Tittonell *et al.*, 2022).

En définitive, « lutter contre les agresseurs des plantes », « protéger ces dernières », ces expressions peuvent, intuitivement, faire référence à une action menée *a posteriori*, une fois la plante attaquée. Or la notion de « santé des plantes », introduite en France par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE, anciennement Inra), englobe également la possibilité d'actions préventives, menées en amont, avant même le semis. On peut également intervenir au niveau du fonctionnement physiologique et des défenses naturelles de la plante cultivée, en les renforçant par différents moyens (irrigation, fertilisation, adoption de variétés adaptées à la sécheresse). Ces aspects ne seront pas développés ici, car ils dépassent le cadre imparti à cet ouvrage.

Nous verrons, dans la seconde partie de l'ouvrage, comment les nombreuses et diverses méthodes et techniques de protection du cotonnier contre les arthropodes ravageurs correspondent aux approches qui viennent d'être exposées ; un accent sera mis sur les manières dont leurs attaques peuvent être anticipées, repoussées, voire éliminées, ainsi que sur les possibilités d'améliorer la régulation naturelle de leurs populations.

Chapitre 6

Diversité des pratiques de protection du cotonnier

Selon la localisation géographique, la diversité des modalités de la culture du cotonnier (voir section «La diversité des modalités de culture du cotonnier», chapitre 1), la diversité locale des arthropodes et la finalité de la production (sociétés cotonnières égrenant le coton-graine et exportant la fibre, ou l'exploitation locale), la protection de la culture adoptée sera foncièrement différente, comme le montrent les deux exemples suivants :

– dans le cas du coton produit pour des marchés «de niche» tels que le coton coloré naturel (figure 82), au Brésil, au Pérou (Duthurburu, 2001), ou le coton biologique certifié (équitable ou non), au Mali ou au Paraguay, la protection des cotonniers doit être conforme aux normes imposées par la certification. Tout insecticide chimique de synthèse est ainsi interdit ;

– à l'inverse, une entreprise agricole brésilienne qui a investi dans du matériel agricole permettant une forte mécanisation s'autorisera l'usage d'insecticides diversifiés, à mode d'action parfois très spécifique, pour un marché interne ou externe ayant des exigences différentes de celles des marchés de niche. Pour des agriculteurs souhaitant atteindre des niveaux de production élevés, la lutte chimique avec des produits de synthèse, souvent qualifiée de protection «conventionnelle», demeure largement employée, tout comme les intrants de synthèse liés à la fertilité du sol.



Figure 82. Capsule mûre ouverte de variété de cotonnier à fibre marron (Brésil, Paraíba, Remígio, novembre 2023)

Qu'elles soient appliquées à l'échelle d'un champ cultivé de taille modeste ou d'une exploitation de plusieurs milliers d'hectares, les principales pratiques de protection actuellement employées sont ici décrites, en lien avec les modes de production « naturelle », biologique (coton certifié) ou « conventionnelle », selon les termes d'usage. Un chapitre particulier est consacré aux programmes de protection originaux, résultant des travaux de recherche du Cirad et de ses partenaires africains dans le cadre de la protection intégrée contre les ravageurs (voir chapitre 7).

Cas de la culture naturelle du cotonnier

Originellement, la culture du cotonnier se faisait avec des variétés sauvages des espèces *Gossypium raimondii* (diploïde) et *G. barbadense*, peu productives, sans aucune protection, avec des insecticides, mais avec des moyens découlant de l'observation locale, comme l'usage, pratiqué par les Incas, de fumigations à base de plantes brûlées telles que l'espèce *Lippia alba*. Cette pratique a encore cours au Pérou (James Vreeland, communication personnelle).

Dans ce pays, les fibres de coton à dominante beige ou marron étaient utilisées pour la confection d'une sorte de cocon enveloppant les momies. Une gamme étendue de coloris variant du rouge au brun a été sauvegardée par J. Vreeland (Vreeland, 1999) et valorisée par l'entreprise Naturtex¹³. Cette culture « naturelle » du cotonnier, sans aucun intrant, n'est que rarement pratiquée aujourd'hui.

Cas de la culture de coton biologique certifié

Ce mode de culture prône l'interdiction totale de l'emploi des produits phytosanitaires de synthèse pour la protection contre les ravageurs, tout en conservant toutefois, et cela pour des raisons techniques (difficulté d'obtention de semences) et économiques (meilleure productivité), les avantages procurés par les variétés améliorées en culture conventionnelle. Le respect d'un cahier des charges parfois jugé « radical » permet l'octroi d'une certification, véritable garantie pour le consommateur. Des contrôles réguliers sont effectués par des organismes certificateurs en vue de la délivrance du certificat de production biologique.

À l'échelle mondiale, la plus grande partie du coton biologique certifié (*organic cotton*, en anglais) est produit par des agriculteurs ne disposant que de faibles superficies (encadré 1).

Il existe, toutefois, au moins un exemple de production mécanisée à large échelle au Texas, production réalisée par les trente-cinq membres d'une coopérative (Texas Organic Cotton Marketing Cooperative) dans des conditions climatiques qui lui sont favorables (Textile Exchange, 2021). Des essais encourageants avaient été réalisés en Californie dans la vallée nord de San Joaquin dans les années 1993 à 1995 (Swezey *et al.*, 1999) grâce à une gestion satisfaisante des punaises du cotonnier.

¹³ <https://naturtex.es>

De 1996 à 2001, une comparaison de trois stratégies différentes de production (coton biologique certifié, coton IPM et culture conventionnelle) avait montré que les populations de la punaise *Lygus hesperus* (Miridae) n'avaient pas dépassé les seuils d'action. Toutefois, les coûts de production, par balle de coton, étaient de 37 % plus élevés pour le coton biologique que ceux enregistrés pour le coton conventionnel (Swezey *et al.*, 2007).

Encadré 1. Le coton biologique dans le monde (Textile Exchange, 2021)

La production de coton biologique a atteint en 2019-2020 la quantité de 249 000 tonnes de fibre, ce qui représente environ 1,0 % de la production mondiale. Elle a été obtenue par 229 000 producteurs sur une superficie de 588 425 hectares. Ces valeurs peuvent être comparées aux 30 millions d'hectares de la culture conventionnelle, dont 25,7 millions réalisés avec des cotonniers génétiquement modifiés. Vingt et un pays sont producteurs de coton biologique, dont l'Inde (124 000 t), la Chine (30 589 t), le Kirghizistan (29 400 t) et la Turquie (24 300 t). Une production globale de 18 000 tonnes de fibre biologique provient des pays d'Afrique subsaharienne, avec, par ordre décroissant de production, la Tanzanie (11 285 t), l'Ouganda (4 734 t), le Bénin (1 373 t), le Burkina Faso (574 t), l'Éthiopie (148 t), le Mali (85 t) et le Sénégal (3 t). Un programme pilote a été développé en Zambie sur 500 hectares. Le Brésil a produit au cours de cette même campagne 134 tonnes de fibre biologique, alors qu'aux États-Unis cette production atteignait un peu plus que 6 900 tonnes.

La culture du coton biologique a pu s'implanter ces dernières années en réaction à l'usage abusif des insecticides chimiques de synthèse et aux effets néfastes qui en résultent, notamment à l'égard des santés respectives de l'applicateur et des consommateurs, ainsi que, plus largement, de l'environnement.

L'utilisation de variétés présentant un caractère de résistance à un ou plusieurs ravageurs est tout naturellement un élément clé en culture biologique du cotonnier, sachant que l'on trouve parmi les variétés sélectionnées commercialisées pour la culture conventionnelle des variétés comprenant déjà de tels caractères de résistance. Rappelons que l'établissement de programmes spécifiques de recherche sur les variétés adaptées pour la culture biologique a été préconisé depuis longtemps (ICAC, 1993).

En culture biologique, les méthodes de protection contre les insectes découlent de savoirs traditionnels ou de méthodes promues par des organisations non gouvernementales (ONG) (Eyhorn *et al.*, 2005 ; PAN, 2005 ; Ouedraogo *et al.*, 2008 ; Levard *et al.*, 2019). Des extraits aqueux de plantes locales communément rencontrées peuvent ainsi être employés en substitution de produits phytosanitaires de synthèse pour la gestion des populations de ravageurs des parties aériennes de la plante (figure 83). Le tableau 2 donne l'exemple des espèces, en très grande majorité des herbacées, répertoriées et utilisées au Paraguay (Silvie *et al.*, 2010).

Des formulations commerciales prêtes à l'emploi sont également utilisées, à base de cristaux et de spores de la bactérie *Bacillus thuringiensis*, ou de la plante de neem (*Azadirachta indica*, Meliaceae), comme TopBio® au Bénin (Silvie, 2022).



Figure 83. Préparation d'extraits de plantes au Paraguay (Guayaybi, novembre 2005)

Dans de plus rares cas, des préparations à base d'insectes malades (de virus, de bactéries ou de mycoses) récoltés au champ, broyés dans une solution aqueuse, sont appliquées au champ (Debru, 2008).

Pour la protection des semences, des pralinages à base de cendres mélangées à de l'urine de vache sont parfois recommandés (Debru, 2008 ; Silvie *et al.*, 2010). Si l'on se réfère aux approches et aux concepts présentés dans le chapitre 5, ces pratiques se rapportent à la stratégie ESR (voir section « De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable », chapitre 5) et à la lutte biologique (voir section « Lutte biologique et biocontrôle », chapitre 5).

Tableau 2. Plantes entrant dans la composition des préparations locales appliquées en culture biologique du cotonnier au Paraguay

| Espèce végétale (famille botanique) | Noms communs (espagnol, guarani ou français) | Partie de la plante utilisée | Maladies et ravageurs visés |
|--|--|------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Alternanthera brasiliana</i> (L.) Kuntze (Amaranthaceae) | Penicilina | Feuilles | Non précisé (divers) |
| <i>Allium cepa</i> L. (Alliaceae) | Cebolla (oignon) | Feuilles | Acariens, pucerons, aleurodes |
| <i>Allium sativum</i> L. (Alliaceae) | Ajo (ail cultivé) | Bulbe | Champignons foliaires, bactéries |
| <i>Artemisia annua</i> L. (Asteraceae) | Ajenjo (armoïse annuelle) | Feuilles | Pucerons, chenilles et aleurodes |

Tableau 2. (suite)

| Espèce végétale (famille botanique) | Noms communs (espagnol, guarani ou français) | Partie de la plante utilisée | Maladies et ravageurs visés |
|---|--|------------------------------------|--|
| <i>Capsicum frutescens</i> L. (Solanaceae) | Aji, <i>ky'yi</i> (piment de Cayenne) | Fruits | Acariens, cochenilles, chenilles de <i>Spodoptera</i> et de <i>Pseudoplusia</i> |
| <i>Carica papaya</i> L. (Caricaceae) | Mamonero (papayer) | Feuilles | Taches foliaires |
| <i>Equisetum arvense</i> L. (Equisetaceae) | Cola de caballo (prêle des champs) | | <i>Oidium</i> et mildiou |
| <i>Melia azedarach</i> L. (Meliaceae)* | Paraíso | Feuilles ou fruits frais | Pucerons, cicadelles, aleurodes et <i>bicho negro</i> (<i>Oxythyrea funesta</i>) |
| <i>Petiveria alliacea</i> L. (Phytolaccaceae) | Apacina, tipi tipi | Racines et feuilles | Non précisé |
| <i>Philodendron bipinnatifidum</i> Schott ex Endl. (Araceae) | <i>Güembé</i> | Feuilles | Non précisé (divers) |
| <i>Polygonum punctatum</i> Elliott (Polygonaceae) | Picantilla, chilillo, <i>kaa-tay</i> | Feuilles | <i>Anthonomus grandis</i> , pucerons, chenilles |
| <i>Rapanea guyanensis</i> Aubl. (Myrsinaceae) | Candelon, manteca | | Non précisé (divers) |
| <i>Ricinus communis</i> L. (Euphorbiaceae) | Tártago, ricino, <i>mba'ysyvo</i> (ricin) | Semences, feuilles | Pucerons, fourmis rouges, charançons, mineuses des feuilles |
| <i>Ruta</i> sp. (Rutaceae) | Ruda (rue officinale) | Plante entière | Acariens, pucerons, cochenilles, charançons |
| <i>Urtica dioica</i> L. (Urticaceae) | Ortiga, <i>pyno guazú</i> (ortie) | Plante entière | Pucerons, vers du sol |

* Contrairement à toutes les autres espèces, *M. azedarach* est un arbre.

Source : Silvie *et al.*, 2010.

En complément de l'usage d'extraits de plantes, un aménagement de l'habitat peut être réalisé, avec la mise en place d'une culture associée — comme le haricot commun (*Phaseolus vulgaris*) par exemple, qui pourra héberger des colonies du puceron *Aphis craccivora* Koch et, conséquemment, des coccinelles prédatrices — ou d'une bordure, partielle ou complète, d'un ou de plusieurs rangs de maïs, créant ainsi une barrière physique (figure 84). La présence de ricin a été également constatée dans certains champs au Paraguay, ce qui est à relier à l'utilisation comme insecticide d'extraits aqueux de cette plante (tableau 2) cultivée pour un marché d'exportation. Ces pratiques, au même titre que l'utilisation de cultures associées ou de plantes-pièges¹⁴ de bordure, relèvent de l'approche de protection agroécologique des cultures.

¹⁴ Cette notion de plante-piège est abordée plus en détail à la section « Associations de cultures et agroforesterie » (chapitre 8).



Figure 84. Parcelle de cotonniers en transition biologique, entourée de pieds de maïs comme barrière physique (Paraguay, Villarica, février 2008)

Une des principales contraintes de production pour le coton biologique réside dans la disponibilité suffisante de semences répondant aux critères de culture biologique (Martin *et al.*, 2010) : semences non traitées, variétés non génétiquement modifiées.

Il n'en reste pas moins que la culture biologique certifiée a donné des résultats encourageants à l'échelle de champs de petites dimensions comme de grandes superficies. Cette pratique, qui implique le respect des exigences définies dans les cahiers des charges, montre bien l'ensemble des divers éléments d'une exploitation qui doit être appréhendé dans l'élaboration de programmes de protection des cultures respectueux de l'environnement.

Cas de la culture cotonnière dite conventionnelle

L'expression « agriculture conventionnelle » (*conventional agriculture*), de plus en plus employée depuis le début des années 2000, a fait récemment l'objet d'une analyse sémantique par Sumberg et Giller (2022). À la « culture conventionnelle » correspond la « protection conventionnelle », qui fait intervenir l'usage de formulations de matières actives de synthèse, communément appelées produits chimiques de synthèse.

La culture conventionnelle repose sur un ensemble de pratiques allant du choix de la variété à la gestion des résidus de récolte, en passant par toutes les étapes de l'itinéraire technique : dates de semis, écartements entre lignes et entre plants sur la

ligne (densité/géométrie de semis), doses d'engrais de synthèse, gestion de l'enherbement (manuelle ou application d'un herbicide de synthèse), gestion des ravageurs et des maladies par la lutte chimique, récolte.

La culture conventionnelle du cotonnier est pratiquée dans toutes les zones de production. En Afrique subsaharienne, les pratiques correspondantes sont recommandées par les institutions de recherche nationales et constituent un véritable référentiel technique. Il convient ici de souligner les différences existant entre la culture conventionnelle pratiquée au Togo par exemple et celle pratiquée dans des pays comme le Brésil, où sont appliqués un nombre élevé de traitements phytosanitaires.

À titre d'exemple, la comparaison d'indicateurs détaillés dans une plate-forme de l'ICAC¹⁵ pour ces deux pays, en 2023, montre les variations très importantes des tonnages d'insecticides employés (16 829 tonnes pour le Brésil contre 22 tonnes pour le Togo), du pourcentage qu'ils représentent dans les coûts de production (20 % au Brésil, 13,9 % au Togo), de leurs coûts par hectare cultivé (663,9 USD¹⁶ contre 58,8 USD au Togo) ainsi que du coût des insecticides par kilogramme de fibre produite (0,34 USD au Brésil contre 0,16 USD au Togo). Ajoutons que l'intensité des effets non intentionnels des traitements chimiques, au niveau de l'environnement notamment, est différente entre les deux pays.

Les deux composantes majeures de la protection intégrée du cotonnier, à savoir la résistance génétique et la lutte chimique, sont détaillées dans les pages qui suivent.

La résistance génétique

L'emploi de variétés présentant un ou plusieurs caractères de résistance à un ravageur ou à une maladie est l'une des principales composantes de la protection intégrée. Dans le cas du cotonnier, le premier caractère d'importance est celui relié à la présence de gossypol dans la plante (voir section « La plante : aspects botaniques », chapitre 1). Intervient également la sélection de caractères conférant aux plantes une résistance à des maladies telles que la bactériose ou des viroses transmises par les insectes piqueurs.

Résistance aux ravageurs

Variétés non génétiquement modifiées

Aux États-Unis, les très nombreux travaux de l'équipe dirigée par J. Jenkins ont été consacrés à la recherche et à l'étude de variétés résistantes vis-à-vis des lépidoptères Noctuidae ou de l'anthonome du cotonnier (Jenkins, 1994; Jenkins et MacCarthy, 1994; Jenkins et Wilson, 1996; McCarty Jr. *et al.*, 2021). Ces travaux, rendus possibles grâce à la mise au point d'élevage de masse de ces ravageurs sur

¹⁵ <https://icacdatabook.de.r.appspot.com/DataPortal/ChartsDetails?subGroupKey=SGK0016&chartKey=CHR0212>

¹⁶ USD : dollar américain.

des milieux artificiels (Jenkins *et al.*, 1995), ont ainsi mis en évidence l'importance de certains caractères comme le taux de gossypol. Des recherches ont également porté sur l'évaluation de races primitives de cotonniers en vue de transférer aux variétés commerciales des traits de résistance à l'anthonome (Jenkins *et al.*, 1978). La nécessité de maintenir un programme de surveillance collective de ce dernier ravageur (Allen, 2008) montre toutefois l'insuccès de cette approche.

Parmi les autres caractères d'intérêt, le caractère de pilosité des feuilles du cotonnier avait été considéré, ce, dès le milieu du siècle dernier, comme un caractère important à conserver pour les cultivars destinés à une agriculture familiale (Parnell *et al.*, 1949; Painter, 1951; Knight, 1952). Il est en effet reconnu comme limitant les attaques de Cicadellidae (du genre *Jacobiella*, par exemple) dans la plupart des situations phytosanitaires. C'est ainsi que des variétés pileuses ont été sélectionnées puis commercialisées en Inde et en Afrique subsaharienne où la récolte du coton-graine est manuelle. En culture intensive, à l'inverse, la pilosité n'est pas appréciée parce qu'elle augmente la souillure de la fibre par des débris végétaux résultant de la récolte mécanisée. Le regain récent des dégâts liés aux espèces de Cicadellidae dans certains pays africains (figure 85) ou la survenue de l'espèce *Amrasca biguttula biguttula* (Distant) signalée d'abord à Madagascar (figure 28), puis sur le continent (voir section « Dégâts directs visibles de l'extérieur », chapitre 2) pourraient être liés à une diminution de pilosité dans les variétés récemment commercialisées.

Depuis une dizaine d'années, la résistance aux thysanoptères, ravageurs qui interviennent en début de cycle, fait l'objet de recherches aux États-Unis (Greenberg *et al.*, 2009; Lahiri *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2022). Les différentes lignées sont étudiées grâce à des dispositifs où des infestations artificielles exercent une pression de déprédation (Arnold *et al.*, 2012).

Il est intéressant de souligner que des effets antagonistes entre caractères peuvent exister vis-à-vis des ravageurs (Hofs, 1992). Ainsi, le caractère pileux peut être apprécié par des lépidoptères tels que *Earias fabia*, *H. virescens* et *H. zea* ou même des punaises Miridae du genre *Lygus*, tandis que la pubescence induit une réduction d'abondance des populations de pucerons ou des Cicadellidae *Empoasca lybica* et *A. devastans* (Hagenbucher *et al.*, 2013).

Variétés transgéniques

Les plantes génétiquement modifiées, encore appelées plantes transgéniques, portent des gènes qui leur confèrent une résistance aux attaques de certains insectes ou une tolérance à certains herbicides. Le plus souvent, les deux types de gènes sont introduits, ce qui permet une vérification des plantes transformées vis-à-vis de la résistance aux insectes par application de l'herbicide toléré.

Les premiers cotonniers génétiquement modifiés (CGM), porteurs du gène *cry1Ac* de la bactérie *B. thuringiensis*, se révélaient résistants aux chenilles carpophages et phyllophages. Appelés « cotonniers Bt » (ou cotons Bt), ils ont été commercialisés aux États-Unis en 1996.



Figure 85. Dégâts foliaires de cicadelles. Noter les bords jaunis des feuilles (Mali, Kafara, novembre 2015)



Figure 86. Effet d'un insecticide régulateur de croissance sur les chenilles défoliatrices *Alabama argillacea* : feuilles vertes dans la parcelle à droite de l'image (Paraguay, Concepción, janvier 2006)

Au Brésil, c'est en 2005 que les autorités de biosécurité du pays ont accordé la première autorisation officielle d'expérimenter en conditions contrôlées des cotonniers Bt porteurs du gène *cry1Ac*. Dès la même année, les comparaisons effectuées dans l'État du Mato Grosso, entre cultivars de cotonniers Bt, officiellement commercialisés, et variétés non-Bt, dans des conditions d'infestations naturelles, ont confirmé l'efficacité de la toxine Cry1Ac vis-à-vis des ravageurs-cibles *Heliothis virescens*, *Pectinophora gossypiella* et *Alabama argillacea*. L'effet des cotonniers Bt sur les chenilles phyllophages, comme *A. argillaceae* (tableau 1), est immédiatement visible. Ces insectes, qui sont d'excellents indicateurs d'efficacité pour des insecticides chimiques (figure 86) ainsi que pour des plants transformés génétiquement, se révèlent de bons indicateurs de la présence de mélanges de semences Bt et non-Bt.

Le tableau 3 donne un exemple de comparaison entre les différentes applications relevées dans une fazenda lors de deux saisons de culture. Si des différences sont notées dans le cas des nombres de traitements visant des chenilles entre cultivars conventionnels et cultivars transgéniques, la présence de l'anthonome et des pucerons vecteurs de maladie bleue est contrôlée.

Tableau 3. Résumé des nombres d'applications réalisées et des produits appliqués sur des cultivars transgéniques (DP 90 B, NuOpal) ou conventionnels (Acala 90, DeltaOpal) dans une ferme agricole de l'État du Mato Grosso (Brésil) en 2006 et 2007

| Cultivars | Campagne 2006-2007 | | | | Campagne 2007-2008 | |
|---|--------------------|--------|--------|-----------|--------------------|--------|
| | Acala 90 | DP 90B | NuOpal | DeltaOpal | DeltaOpal | NuOpal |
| Nombre d'applications | 17 | 19 | 15 | 14 | 27 | 26 |
| Nombre total de formulations appliquées | 30 | 24 | 18 | 22 | 41 | 36 |
| Applications «aphicides» | 9 | 13 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Applications «acaricides» | 6 | 7 | 7 | 3 | 3 | 3 |
| Applications contre les aleurodes | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| Applications contre des chenilles | 9 | 1 | 1 | 8 | 10 | 6 |
| Applications contre l'anthonome | 5 | 1 | 3 | 3 | 19 | 19 |
| Applications contre les punaises | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |

En 2019, les cultures de plantes génétiquement modifiées (toutes cultures et événements de transformation confondus) ont couvert 190,4 millions d'hectares (Mha), emblavés dans vingt-neuf pays (ISAAA, 2019). Le cotonnier GM représentait 13,5 % de cette superficie totale. La fibre de ces cotonniers est commercialisée indifféremment avec celle provenant des variétés conventionnelles.

Cette même année, la culture de cotonniers GM a couvert 25,7 Mha, ce qui a représenté 79 % de la superficie totale cultivée en coton dans le monde. Les cultivars commercialisés résistants aux insectes, porteurs d'un ou de plusieurs gènes de la bactérie *B. thuringiensis*, représentaient 18,4 Mha en 2019, 6,7 Mha étaient constitués de plants à la fois résistants aux insectes et tolérants aux herbicides, le reste (0,6 Mha) n'étant formé que de plants tolérants aux herbicides.

Avec des taux très importants d'adoption des CGM par les producteurs, les cinq premiers pays planteurs de CGM étaient, en 2019, l'Inde (11,9 Mha, sur un total de 12,24 Mha cultivés en coton), les États-Unis (5,31 Mha sur un total de 5,42 Mha), la Chine (3,17 Mha sur un total de 3,3 Mha, soit un taux d'adoption par les producteurs de 96 %), le Pakistan (2,5 Mha) et l'Argentine (485 000 ha). L'Australie, pour sa part, a cultivé 59 850 hectares de CGM.

En Afrique, pour la même année, seuls six pays anglophones font état de la culture de CGM. Parmi eux, le Soudan est le pays ayant cultivé la plus grande superficie (236 200 ha), suivi par l'Afrique du Sud (43 654 ha), le Malawi (6 000 ha), le Nigeria (700 ha), l'Eswatini (anciennement Swaziland) (401 ha) et l'Éthiopie (311 ha) (ISAAA, 2019). Le Kenya a rejoint cette communauté en 2020 (Marquardt *et al.*, 2020). Parmi les pays francophones, seul le Burkina Faso a entrepris la culture des CGM entre 2009 et 2016 (Vognan et Fok, 2019). La qualité de la fibre de ces cotonniers, jugée insuffisante, a été à l'origine de son abandon (Dowd-Urbe et Schnurr, 2016).

Résistance aux maladies transmises par les insectes

Les plus importantes maladies du cotonnier dont l'agent est transmis par des insectes vecteurs sont la « maladie bleue » et la mosaïque, la première avec comme vecteur le puceron *Aphis gossypii*, la seconde avec comme vecteur l'aleurode *Bemisia tabaci*.

La maladie bleue a été décrite, sous cette dénomination, pour la première fois en 1949, en République centrafricaine (Cauquil et Follin, 1983), pays où jusqu'à 30 % des plants présentaient les symptômes dans certains champs (Cauquil et Vaissayre, 1971). Il s'agit, avec la mosaïque, des deux maladies les plus fréquemment rapportées en Afrique (Lourens *et al.*, 1972 ; Cauquil et Follin, 1983). Sur ce continent, les modalités de transmission par les pucerons ont été étudiées par Cauquil et Vaissayre (1971), et les pertes potentielles dues à la maladie, déterminées (Cauquil, 1977). D'une manière intéressante, des plantes-hôtes de l'agent pathogène ne manifestant cependant pas de symptômes ont été identifiées, comme *Ipomoea triloba*, *Hibiscus sabdariffa* et *Sida rhombifolia*. L'hypothèse d'une origine virale fut émise, mais le virus n'a jamais été identifié en Afrique (Ferguson et Ali, 2023), bien que le mode de transmission fût reconnu de type « persistant » (Cauquil et Follin, 1983). Le premier moyen de lutte contre la maladie a consisté en la lutte chimique contre le vecteur (Cauquil, 1974 ; Cauquil *et al.*, 1978 ; Cauquil *et al.* 1982).

Au Brésil, des symptômes décrits comme *vein mosaic* (*mosaico-das-nervuras*) avaient été constatés en 1938 (Costa et Forster, 1938). Une forme plus sévère fut ensuite observée à Ribeirão Bonito, dans l'État de São Paulo. Elle a été dénommée *doença azul* (soit « maladie bleue », par référence au nom français donné initialement) *forma* « Ribeirão Bonito » (Costa et Carvalho, 1962), mais elle est *a priori* différente de la forme africaine (figure 87). Observée en 1977 au Paraguay, elle ne s'est révélée dommageable qu'en 1993, après l'introduction et le semis d'un matériel génétique très sensible provenant des États-Unis. C'est au Brésil que l'identification d'un virus pathogène a été faite pour la première fois (Corrêa *et al.*, 2005). La variabilité génétique du virus a été explorée à partir des prospections de terrain réalisées dans différents États (Da Silva *et al.*, 2007). L'analyse moléculaire des plants ayant des symptômes parfois atypiques, avec des feuilles un peu rougeâtres (figure 88), a souligné la complexité à identifier d'une manière précise les virus pathogènes en cause (Da Silva *et al.*, 2008 ; Distéfano *et al.*, 2010 ; Fausto da Silva *et al.*, 2015 ; Agrofoglio *et al.*, 2017). Les dernières observations faites au Brésil ont permis de remarquer des symptômes atypiques sur des cultivars commercialisés avec le critère de résistance à la maladie bleue, et de les relier à trois isolats du virus (Galbieri *et al.*, 2010). Plus récemment, une autre forme de la maladie a été caractérisée. Les dénominations actuelles sont CBD (*cotton blue disease*) pour la forme africaine, CLRDV (*cotton leaf roll dwarf virus*) pour les formes typique ou atypique sud-américaines, et CLRDD (*cotton leaf roll dwarf disease*) pour la forme nord-américaine (Edule *et al.*, 2023). En Australie, un autre *Polerovirus* est identifié comme CBTV (*cotton bunchy top virus*) (Sharman *et al.*, 2021).

En Afrique, la résistance variétale à cette maladie est l'un des critères retenus par les sélectionneurs (Mahama et Cauquil, 1976), tout comme la résistance à la mosaïque ou à la bactériose. Une pratique commune consiste à laisser les lignées à sélectionner sans protection phytosanitaire de façon que les vecteurs s'installent sur les plantes et que les symptômes puissent s'exprimer lorsque le vecteur est effectivement infecté. Au Brésil, aujourd'hui, la sélection réalisée par l'institut Mato Grosso du coton, IMA-MT, est réalisée dans des conditions d'infestations artificielles dans de grandes serres (figure 89).

Au plan économique, la création par la coopérative brésilienne COODETEC¹⁷ de la variété CD401 résistante à cette maladie a joué un rôle déterminant dans la conquête des marchés de semences au sud du Brésil, dans l'État du Paraná, où la culture du cotonnier était importante à cette période, et au Paraguay (Bélot *et al.*, 2005a et 2005b). Il est à noter que, dans les conditions d'infestations naturelles des cotonniers au champ par les pucerons, l'expression des symptômes n'est régulière ni dans l'espace ni dans le temps, ce qui gêne considérablement les travaux d'amélioration génétique. Des infestations expérimentales conduites en serre dans l'État du Paraná ont permis de confirmer l'hypothèse du caractère monogénique de la résistance à la maladie (Pupim Junior *et al.*, 2008).

¹⁷ Aujourd'hui disparue.



Figure 87. Plant de cotonnier nain affecté par le virus de la maladie bleue (Tchad, Bébedjia, septembre 1986)



Figure 88. Symptômes de la maladie bleue atypique (feuilles rougeâtres) sur un cotonnier (Brésil, Mato Grosso, avril 2008)

Dans le contexte décrit au Brésil, l'hypothèse d'une forme de contournement de la résistance des cultivars réputés indemnes a été soulevée, ce que semblent confirmer des travaux moléculaires plus récents consacrés à l'analyse de la protéine de la capsid virale et de l'ARN, et à la mise en évidence de mécanismes éventuels de recombinaison (Da Silva *et al.*, 2008). Cette maladie soulève donc encore de nombreuses questions, relatives à l'identification moléculaire de l'agent pathogène (Ferguson et Ali, 2023) ou à l'épidémiologie de la maladie.

La lutte chimique

Aujourd'hui, parallèlement à l'utilisation de variétés génétiquement améliorées¹⁸, la lutte avec des insecticides¹⁹ de synthèse est la méthode la plus employée pour protéger la graine ou les parties aériennes. Il s'agit en effet pour les pays producteurs d'être en mesure de répondre à la demande mondiale, en matière à la fois de quantité et de qualité.

Pourtant, dans le cas des pays africains, il n'était pas imaginé à une époque d'utiliser à grande échelle des insecticides chimiques. Quoiqu'il en soit, l'utilisation des insecticides, comme celle d'autres intrants (fertilisants, fongicides pour traitement de semences, herbicides), s'est de plus en plus répandue, notamment en Afrique subsaharienne. Elle a été rendue possible grâce à la conjonction d'éléments favorables à une production de qualité du coton : obtention de variétés améliorées (en particulier par l'Institut de recherches du coton et des textiles exotiques, l'IRCT), organisation d'une filière intégrant les agents économiques des diverses phases du cycle, de la production à la commercialisation, nécessité de tenir compte des impératifs de rentabilité à l'échelle internationale.

Dans le cas du cotonnier, la lutte chimique au moyen de molécules organiques de synthèse²⁰ apparaît souvent inévitable, au moins à partir de certaines étapes du cycle de production, lorsque le niveau de populations de ravageurs clés comme *H. armigera* ou *A. grandis* devient élevé. Seuls des traitements permettent alors de protéger les organes fructifères et de réduire ainsi des pertes pouvant parfois atteindre 100 % de la production en cas de non-protection.

L'inventaire des dégâts sur cotonnier et des arthropodes qui en sont responsables conditionne *de facto* la mise en œuvre de méthodes de protection qui peuvent être de nature préventive ou curative.

Le premier cas peut être illustré par les traitements de semences qui, réalisés avec des insecticides systémiques, viseront les insectes piqueurs-suceurs de début de cycle, voire les myriapodes. La protection contre des ravageurs comme le

¹⁸ Qui répondent bien, en particulier, à des niveaux élevés d'engrais minéraux.

¹⁹ Sauf précision dans le texte, le terme « insecticide » doit être compris dans un sens plus large, incluant les produits chimiques tuant les insectes et/ou les acariens.

²⁰ Celles-ci ne sont pas précisées dans cet ouvrage, car elles sont très variables selon les pays, les années, les espèces de ravageurs et les périodes du cycle de développement des cotonniers.

Curculionidae *E. brasiliensis* au Brésil relève également de cette situation. En effet, les connaissances actuelles sur la biologie de cet insecte ne permettent pas d'envisager par avance l'importance des dégâts qu'il occasionnera en début de campagne et des pertes potentielles liées à la destruction des plants par suite de leur dessèchement. Des applications foliaires sur les plants de bordure sont ainsi faites de manière préventive.

Protection de la graine et de la jeune plante

Pratique fondamentalement préventive, la protection de la graine est obtenue par enrobage avec des poudres ou des liquides soit fongicides, ce qui permet à la plante d'être protégée contre les maladies du sol, soit insecticides à action systémique (comme les néonicotinoïdes) qui circulent dans la jeune plante et la protègent à la fois contre les ravageurs intervenant au stade de la levée et jusqu'à trente jours suivant la germination, et contre les insectes piqueurs-suceurs. L'efficacité de ce moyen de lutte est également bien démontrée dans le cas de la protection contre le Curculionidae *E. brasiliensis*, dans l'État du Paraná, au sud du Brésil. Les producteurs expérimentés y traitent systématiquement leurs semences contre l'action de ce charançon dont les attaques, survenant à partir des bordures, sont difficiles à détecter et se révèlent variables d'une année à l'autre.

Protection des parties aériennes de la plante

Le nombre de traitements, les matériels d'application, les insecticides appliqués en mélange ou non sont très différents selon les pays, les conditions de culture, la durée du cycle de production lui-même lié aux conditions climatiques (géographie nord-sud), à la variété (voir chapitre 1). Quelques exemples contrastés sont donnés dans la suite du texte.

Les institutions de recherche nationales africaines ont élaboré un calendrier préétabli d'applications foliaires, la première réalisée selon les cas au 30^e, au 40^e ou au 45^e jour après le semis ou la levée — ce qui correspond à l'apparition des premiers boutons floraux — et suivie par quatre à cinq autres traitements, chacun espacé de quatorze jours (figure 90). Une formulation est appliquée à chaque date, sans observation préalable, avec un changement de produits selon trois « fenêtres » d'application (Ochou *et al.*, 2021), afin d'éviter d'employer des matières actives à mode d'action similaire (stratégie de gestion de la résistance aux insecticides).

Dans le cas des agriculteurs qui disposent de petites superficies à protéger, les formulations sont appliquées à l'aide de deux types de pulvérisateurs :

- à dos, avec pression entretenue avec un réservoir relié à une lance; un bras articulé manœuvré par l'opérateur permet d'assurer la pression nécessaire à la pulvérisation (figure 91). En Chine, des réservoirs comportant une batterie rechargeable dans leur partie basale sont disponibles (figure 92). L'agriculteur ou l'agricultrice n'a plus à manœuvrer un bras articulé et le travail d'épandage en est facilité;

– à l'aide d'appareils à disque rotatif alimenté par cinq à huit piles logées dans le manche de l'appareil (figure 93). Cette technique permet, avec l'aide du vent et selon la vitesse de marche de l'applicateur, de protéger plusieurs lignes parallèles, avec des doses de bouillies insecticides variables de 1,3 à 10,0 litres par hectare (technique appelée « très bas volume » ou TBV).

La technique d'application de gouttelettes électrisées, développée dans plusieurs pays, s'est avérée très efficace pour permettre un dépôt homogène de gouttelettes insecticides sur les deux faces des feuilles. Silencieuse, en comparaison avec le bruit



Figure 89. Dispositif de sélection variétale en serre vis-à-vis d'une maladie du cotonnier (Brésil, Mato Grosso, Primavera do Leste, mai 2022)

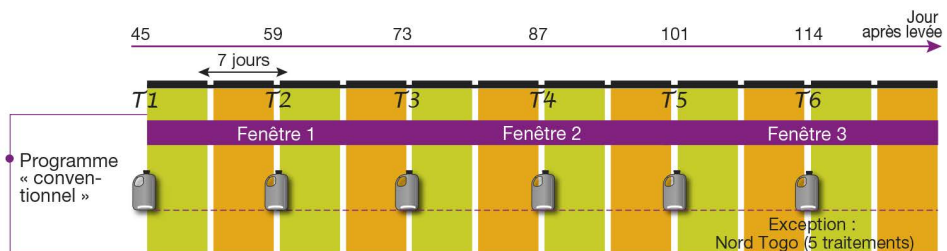


Figure 90. Schéma général du programme de protection du cotonnier en culture conventionnelle. Les six applications foliaires (T1 à T6) sont espacées de quatorze jours, la première commençant au 45^e jour après la levée. Le risque de résistance des organismes cibles aux insecticides (pyréthri-noïdes initialement) est géré en utilisant des matières actives à mode d'action différent selon les trois fenêtres définies. Source : Silvie *et al.*, 2011.



Figure 91. Appareil de pulvérisation à dos équipé d'une rampe (Bénin, Gobé, octobre 1997)



Figure 92. Appareil de pulvérisation à dos électrique ; la batterie est dans la partie basale (Chine, Hubei, août 2015)



Figure 93. Appareil de pulvérisation à disque rotatif et réservoir dorsal pour appliquer à « très bas volume » (10 l/ha) (Bénin, Sikki-Gourou, septembre 1994)



Figure 94. Brûlures sur feuilles de cotonnier dues à l'application par un appareil à pulvérisation électrostatique (Togo, Pana, septembre 1991)

occasionné par la rotation des disques, elle a pu parfois entraîner des brûlures sur les feuilles (figure 94) par suite de surdosage réalisé par l'applicateur craignant de n'avoir pas suffisamment pulvérisé l'insecticide. Elle a été par la suite abandonnée par la firme qui la promouvait (Kabissa *et al.*, 2021).

La bouillie épanchée est soluble dans l'eau ; elle est préparée au moment du traitement et au bord de la culture, avec des compositions variables, simples, binaires, voire ternaires, adaptées au complexe des ravageurs rencontrés selon l'époque de l'année. Dans le cas des cultures conduites sur de très grandes surfaces, comme au centre ouest du Brésil, les applications sont faites par voie terrestre, au moyen de tracteurs avec pulvérisateur attelé (figure 95), d'enjambeurs équipés de rampes latérales ou par voie aérienne, avec des avions équipés de rampes et de buses ou de turbines (figure 96). Les volumes pulvérisés par hectare sont ainsi



Figure 95. Tracteur équipé d'une rampe horizontale (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, avril 2003)



Figure 96. Chargement du réservoir d'un avion de traitement du cotonnier (Brésil, Mato Grosso, fazenda São José, avril 1999)

variables selon le mode d'application de 15-20 litres par hectare (par avion) à 150 litres par hectare (par voie terrestre). Un nombre très important (15 à 20) de pulvérisations avec des mélanges pouvant comporter jusqu'à cinq produits peut être réalisé au cours d'un cycle cultural. Le tableau 4 donne l'exemple de deux programmes d'application de formulations insecticides dans une exploitation (fazenda) de l'État du Mato Grosso, réalisés en 2000 selon une date de semis précoce (14 au 16 décembre 1999, cycle long qualifié de grande campagne ou *saфра*) ou tardive (21 février 2000, cycle court ou *safrinha*).

Tableau 4. Programmes des formulations commerciales insecticides appliquées dans une exploitation de l'État du Mato Grosso (Brésil) selon la date de semis

| Date de semis : 14 au 16 décembre 1999 | | Date de semis : 21 février 2000 | |
|--|--|---------------------------------|-----------------------------|
| Dates de traitement | Formulations appliquées | Dates de traitement | Formulations appliquées |
| 27/12/1999 | Laser | 08/03/2000 | Marshal |
| 03/01/2000 | Laser | 14/03/2000 | Marshal |
| 06/01/2000 | Laser + Mospilan | 17/03/2000 | Marshal + Azodrin |
| 13/01/2000 | Laser + Mospilan | 22/03/2000 | Thiodan + Marshal |
| 24/01/2000 | Lannate + Mospilan | 30/03/2000 | Marshal + Mospilan |
| 04/02/2000 | Laser + Mospilan + Laser | 06/04/2000 | Marshal + Lannate |
| 10/02/2000 | Mospilan + Azodrin + Pirephos + Nomolt + Laser | 20/04/2000 | Lannate + Mospilan + Nomolt |
| 15/02/2000 | Mospilan + Laser + Lannate | 05/04/2000 | Marshal |
| 24/02/2000 | Mospilan + Laser | 10/05/2000 | Marshal |
| 02/03/2000 | Pirephos + Nomolt + Laser + Mospilan | TOTAL | 9 |
| 09/03/2000 | Laser + Pirephos + Nomolt | | |
| 17/03/2000 | Azodrin + Laser | | |
| 25/03/2000 | Polo + Fastac | | |
| 02/04/2000 | Fastac + Azodrin + Nomolt | | |
| 07/04/2000 | Fastac + Laser | | |
| 29/04/2000 | Fastac | | |
| TOTAL | 16 | | |

Par comparaison avec ces programmes et avec les données du tableau 3, le tableau 5 établi dans la même exploitation pour un semis du 16 décembre 2021, soit vingt-deux ans plus tard, montre que — avant même la fin du cycle de protection, et malgré l'adoption de variétés transgéniques — le nombre de pulvérisations foliaires appliquées après la date de semis a augmenté.

Tableau 5. Programme des formulations commerciales insecticides appliquées dans la même exploitation que celle du tableau 4, en 2022 (Mato Grosso, Brésil). Deux traitements ont été réalisés avant le semis (le 16 décembre 2021), dans les couvertures végétales desséchées (organismes particuliers visés : anthonome du cotonnier – en gras – et acariens – en italique)

| Jour avant ou après semis | | |
|----------------------------------|------------|---|
| -35 | 11/11/2021 | Lannate BR |
| -21 | 25/11/2021 | Lannate BR |
| Semis : 16 décembre 2021 | | |
| 1 | 17/12/2021 | Hero 380 EC + Lannate BR |
| 26 | 11/01/2022 | Java + Premio |
| 32 | 17/01/2022 | Java + Wild |
| 39 | 24/01/2022 | Malathion |
| 47 | 01/02/2022 | Abadin 72 EC + Sperto |
| 50 | 04/02/2022 | Kraton 100EC + Premio |
| 60 | 14/02/2022 | Abadin 72 EC + Marshal + Premio + Sperto |
| 61 | 15/02/2022 | Wild |
| 65 | 19/02/2022 | Malathion |
| 67 | 21/02/2022 | Diafentiuron CCAB + Java + Smite |
| 74 | 28/02/2022 | Abadin 72 EC + Kraton 100EC + Marshal |
| 78 | 04/03/2022 | Hero 380 EC |
| 82 | 08/03/2022 | Sperto |
| 86 | 12/03/2022 | Diafentiuron CCAB + Premio + Malathion |
| 89 | 15/03/2022 | Abadin 72 EC + Exalt + Pirephos EC |
| 93 | 19/03/2022 | Wild |
| 95 | 21/03/2022 | <i>Trigger 240 SC</i> |
| 102 | 28/03/2022 | Diafentiuron CCAB + Exalt + Kraton 100EC + Smite + Malathion |
| 110 | 05/04/2022 | Abadin 72 EC + Hero 380 EC + Java + Marshal |
| 111 | 06/04/2022 | Malathion |
| 123 | 18/04/2022 | Malathion |
| 125 | 20/04/2022 | Premio |
| 126 | 21/04/2022 | Wild |
| 131 | 26/04/2022 | Galeão + Hero 380 EC + <i>Trigger 240 SC</i> |
| 138 | 03/05/2022 | Malathion |
| 141 | 06/05/2022 | Cipermetrina |
| 144 | 09/05/2022 | Malathion |
| TOTAL traitements | | 27 |

Ambiguïtés inhérentes à l'utilisation des insecticides

L'emploi systématique et à grande échelle d'insecticides de synthèse soulève un certain nombre de questions, et cela à des niveaux d'appréciation différents. Il en est ainsi de la toxicité vis-à-vis de l'applicateur et de l'environnement (régulation par les ennemis naturels, pollinisation, pollution potentielle des cours d'eau), de la sélectivité des molécules de synthèse employées, de leur efficacité à court et à long terme (durabilité) et du risque à long terme de sélectionner des populations de ravageurs résistantes à ces molécules.

Aujourd'hui, les effets secondaires des produits phytosanitaires appliqués en culture cotonnière sont de mieux en mieux caractérisés. Ils sont même étudiés dans des pays d'Afrique subsaharienne où peu de données sont généralement disponibles (Gomgnimbou *et al.*, 2009 ; Agbohessi *et al.*, 2012 ; Adechian *et al.*, 2015 ; Donald *et al.*, 2016 ; Gouda *et al.*, 2018 ; Djagni et Fok, 2019, Le Bars *et al.*, 2020).

Nous nous intéresserons ici aux aspects concernant respectivement la sélectivité des molécules et la résistance des ravageurs.

Sélectivité

L'emploi du terme « insecticide » (ou d'autres termes plus restrictifs comme « acaricide », « nématocide », « molluscicide », « aphicide ») présuppose une sélectivité des substances ou des formulations concernées vis-à-vis d'organismes appartenant à des groupes taxinomiques identifiés. Dans la réalité, des effets toxiques peuvent être enregistrés vis-à-vis d'autres groupes, y compris des vertébrés (oiseaux, reptiles, poissons, être humain). La sélectivité des insecticides vis-à-vis des organismes bénéfiques de type pollinisateur ou ennemi naturel (hyménoptères, diptères) est en fait rarement démontrée. La qualification de « biocide » serait sans doute plus appropriée dans de nombreux cas. Afin de mieux connaître le statut toxicologique des matières actives, le mode d'action des molécules appliquées et les modalités de gestion des résistances éventuellement constatées chez les insectes, tout utilisateur gagnerait à consulter les classifications proposées sur les sites respectifs de l'Organisation mondiale de la santé²¹ et de l'Insecticide Resistance Action Committee (IRAC)²².

Au niveau du champ, un moyen de mesurer la sélectivité de formulations ou de matières actives vis-à-vis des différents groupes d'intérêt (ravageurs, ennemis naturels et pollinisateurs) est d'établir des comparaisons d'action entre elles. Celles qui présentent le plus d'intérêt dans un choix multicritères pourront être retenues, par exemple celles qui sont plus efficaces contre telle espèce de ravageurs avec une moindre incidence sur les ennemis naturels.

Les modalités de comparaison diffèrent selon les pays. En Amérique latine, les programmes de traitement recommandés par les firmes ne font intervenir que leurs propres spécialités commerciales. Il n'y a pas de véritable comparaison entre des

²¹ <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/chemical-safety-pesticides>

²² <https://irac-online.org/>

matières actives concurrentes. Les essais réalisés dans les stations de recherche sont le plus souvent des essais-doses de molécules, chaque essai étant financé exclusivement par la firme concernée. Il n'en est pas de même en Afrique où les molécules des différentes firmes sont comparées entre elles dans les stations de recherche au long d'applications successives correspondant à un véritable programme de traitement adapté au cycle cultural. Une telle manière de procéder permet de dégager davantage de recommandations pratiques utiles pour les agriculteurs.

L'encadré 2 précise ainsi quelques différences relevées dans les méthodes d'étude des matières actives entre les deux continents. Certaines méthodes appliquées sur un continent ne peuvent l'être sur l'autre, comme la mise en place de lignes de bordure non traitées pour les parcelles élémentaires, qui seraient, en Amérique latine, une source importante de prolifération de l'anthonome.

Encadré 2. Éléments de comparaison des méthodes d'études des matières actives réalisées en Afrique et en Amérique du Sud

Les dispositifs statistiques employés pour l'étude au champ des matières actives insecticides sont similaires de part et d'autre de l'Atlantique. Il s'agit de blocs de Fisher, avec plusieurs répétitions (six à huit en Afrique, plutôt quatre en Amérique du Sud) et avec des parcelles élémentaires de quatre à dix lignes de dix ou vingt mètres de long. Cependant, en Afrique, une à deux lignes de bordure non traitées sont généralement conservées de part et d'autre des parcelles élémentaires, afin de permettre une réinfestation de la partie centrale traitée. Les effets de cette pratique sont visuellement constatés, avec des plants généralement défoliés par les chenilles phylophages, sur les lignes de bordure.

Des modalités de semis et d'espacements légèrement différentes sont notées entre les deux continents : semis manuel dans des poquets en Afrique sur des lignes espacées de 1,0 mètre avec application de l'engrais à la main tout le long de la ligne, usage d'un semoir manuel (canne planteuse ou *matraca*) au Paraguay ou au Brésil avec un espacement de 0,9 mètre entre les lignes et application avec le semoir de l'engrais localisé à côté des semences.

Les modalités d'observation et d'analyse sont différentes. En Afrique, plusieurs traitements sont effectués avec la même molécule à intervalles réguliers (quatorze jours généralement). De plus, l'observation d'un ravageur est effectuée durant tout le cycle du cotonnier. En Amérique du Sud, la présence d'un ravageur donné (ou de ses dégâts) est recherchée avant une application de la matière active étudiée, puis un ou plusieurs comptages du même ravageur sont réalisés à différentes dates après cet unique traitement.

L'efficacité et la dose homologuée sont définies en Amérique latine après comparaison au résultat obtenu sur les parcelles « témoin », non traitées. En Afrique, un témoin « chimique » constitue généralement la référence, car les écarts (de production, par exemple) sont très importants lorsqu'un objet « non traité » est mis en place.

Résistance

L'existence de populations de ravageurs résistantes aux insecticides, ou ayant perdu partiellement la sensibilité, a été démontré en Afrique subsaharienne dans le cas des pyréthrinoides chez différents ravageurs comme le lépidoptère *H. armigera* (Martin *et al.*, 2000 et 2005 ; Brévault et Achaleke, 2005 ; Brévault *et al.*, 2008a ; Achaleke *et al.*, 2009a et 2009b ; Achaleke et Brévault, 2010) ou dans le cas de molécules comme la deltaméthrine, la bifenthrine, le diméthoate, l'endosulfan,

le thiaméthoxan, chez *Bemisia tabaci* (Houndété *et al.*, 2010). Les mécanismes moléculaires de la résistance ont été particulièrement décrits dans le cas des lépidoptères Noctuidae, *Helicoverpa armigera*, ou *Spodoptera frugiperda* (Le Goff et Nauen, 2021). De très nombreux cas de résistance sont répertoriés dans le monde avec des insectes du cotonnier (Kranthi et Russell, 2009).

En évoquant de telles conséquences dès la parution de *Silent Spring* en 1962, Rachel Carson avait tenté d'attirer l'attention de ses lecteurs. Il a cependant fallu l'épreuve du temps et la manifestation de résistances au champ pour réellement conduire à une prise de conscience de la nécessité de réduire l'usage des insecticides. Dans le cas du cotonnier, cette réduction d'emploi, sinon sa suppression, présente également un intérêt économique en Afrique, où la plupart des insecticides sont importés sous la forme de préparations prêtes à l'emploi ou de matières actives à formuler sur place. Elle a ainsi fait l'objet de recherches sur ce continent dès les années 1980.

Chapitre 7

Vers une réduction de l'emploi des insecticides de synthèse en Afrique subsaharienne

Les recherches en Afrique ont été menées par les entomologistes de l'IRCT puis du Cirad, présents sur place, en partenariat avec les institutions de recherche nationales. L'objectif était d'élaborer des programmes de protection employant des quantités moindres d'insecticides. Les premières expérimentations entreprises impliquaient, strictement et d'une manière originale, la réduction des doses. Les programmes ultérieurs ont fait intervenir l'emploi de seuils avant intervention, ces seuils correspondant au niveau de dégâts ou de populations d'insectes qui nécessitaient économiquement des traitements. Toutefois, selon les pays et les difficultés ou les craintes d'adoption directe des seuils *sensu stricto*, les travaux réalisés ont conduit à des modalités pratiques différentes.

Les pages qui suivent présentent les différents programmes qui ont été élaborés et développés dans les stations de recherche comme à plus grande échelle, dans les pays francophones de la ceinture de production d'Afrique subsaharienne, soit, d'ouest en est, le Sénégal, le Mali, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Togo, le Bénin, le Cameroun et le Tchad, la comparaison se faisant par rapport à la référence issue du programme recommandé par les institutions de recherche cotonnière nationales.

Programme de protection dose-cadence

Au Tchad, un programme de réduction de doses avec augmentation de la cadence des traitements a été expérimenté sur station (Aspirot et Menozzi, 1985 ; Deguine et Silvie, 1988). La dose de produit chimique était réduite d'un tiers et un traitement réalisé tous les sept jours au lieu de quatorze jours, cadence (ou fréquence) du programme recommandé. Un suivi rapproché des ravageurs et de leurs dégâts était effectué au moyen d'observations hebdomadaires. L'efficacité biologique de ce programme « dose-cadence » en matière de gestion des populations de ravageurs rencontrés s'est révélée supérieure à celle du programme recommandé, mais la production de coton-graine n'est pas apparue statistiquement différente entre les deux programmes.

Un tableau des doses d'emploi de différentes matières actives fut ainsi établi avec les deux fréquences d'application de sept et quatorze jours (tableau 6) de manière à pouvoir disposer de différentes options d'insecticides en milieu producteur.

Cette pratique a toutefois fait l'objet de discussions et de controverses, notamment parce que l'on a estimé qu'elle aurait pu induire la sélection de populations de ravageurs résistants aux insecticides. Aussi n'a-t-elle pas été retenue par la suite.

Tableau 6. Comparaison des doses d'emploi de différents types d'insecticides préconisées avec les deux types de programmes au Tchad, le programme recommandé et le programme dose-cadence

| Groupes | Matières actives | Doses d'emploi (g/application/ha) Programme recommandé | Doses d'emploi (g/application/ha) Programme « dose-cadence » |
|---------------------------------------|--------------------|---|---|
| Pyréthrinoïdes | bifenthrine | 25 | 10 |
| | cyfluthrine | 18 | 6 |
| | cyperméthrine | 36 | - |
| | deltaméthrine | 10 | 4 |
| | fenvalérate | 60 | - |
| Organophosphorés à effet acaricide | chlorpyrifos éthyl | 300 | 100 |
| | profénofos | 300 | 100 |
| | triazophos | 250 | 75 |
| Organophosphorés à effet aphicide | chlorpyrifos éthyl | 450 | 150 |
| | diméthoate | 300 | 100 |
| | monocrotophos | 250 | 75 |
| | ométhoate | 300 | 100 |

Source : Deguine et Silvie, 1988.

Programmes de protection avec seuils

Historiquement, dans le cas des petits producteurs d'Afrique anglophone, les premiers seuils signalés dans la littérature sont ceux adoptés au Zimbabwe par Matthews et Tunstall (1968) dans le cas du ravageur *Helicoverpa armigera*. Des seuils ont par la suite été définis pour la plupart des espèces d'importance économique avec des variations observées selon les pays et les insectes en cause. Dans les pays francophones d'Afrique, des seuils ont ainsi été introduits pour différents ravageurs : *H. armigera*, *D. watersi*, *Earias* spp., chenilles carpophages (Silvie *et al.*, 2001).

Le tableau 7 montre que les seuils font intervenir un niveau d'infestation ou un niveau de dégât et souligne, en outre, la variabilité des valeurs recensées dans la littérature pour *H. armigera*, notamment dans le cas des agricultures africaines comprenant des exploitations de taille modeste (Ouganda, Soudan, Tanzanie, Togo, Zambie, Zimbabwe).

En pratique, à l'échelle du champ cultivé, un échantillonnage est effectué préalablement à l'aide d'une planchette à cheville (*pegboard*, en anglais, initialement décrite par Beeden, 1972). Cet outil, qui facilite l'observation des ravageurs ou de leurs dégâts par les producteurs, permet de déterminer leur niveau d'infestation et donc de voir si les seuils sont atteints. Les seuils sont en effet indiqués dans une zone de la planchette, généralement de couleur rouge (figure 97) (Renou et Brevault, 2016).

Tableau 7. Exemples de seuils adoptés pour *Helicoverpa armigera* relevés dans la littérature

| Pays | Seuil recommandé ou expérimenté | Références |
|----------------|---|--|
| Afrique du Sud | 12 œufs ou 2 larves/24 plants | Kfir et Van Hamburg, 1983 |
| Chine | 13 larves/100 plants (coton Bt) | Wu et Guo, 2005 |
| Ouganda | 5-7 larves/100 plants | Sekamatte et Heneidy, 1997 |
| Ouzbékistan | 20-25 œufs/100 plants (avant lâchers de trichogrammes) | Eschanov et Namazov, 2021 |
| Soudan | 30 œufs ou 10 larves/100 plants | Bashir <i>et al.</i> , 2003 |
| Tanzanie | 0,5 boutons floraux attaqués lors de deux comptages successifs | Nyambo, 1989 |
| Tanzanie | Entre 10 % et 20 % de boutons floraux attaqués | Kabissa, 1989 |
| Thaïlande | 20 larves/100 plants | Genay, 1994 |
| Togo | 4 œufs ou 6 (œufs + larves) de chenilles exocarpiques | Silvie et Sognigbe, 1993 |
| Zambie | 0,5 œuf/plant | Matthews et Tunstall, 1968 ; Javaid, 1990 |
| Zimbabwe | 0,5 œuf/plant | Matthews et Tunstall, 1968 |

D'une manière intéressante, l'emploi des seuils en Afrique francophone a été expérimenté selon trois approches au sein de programmes appelés respectivement LEC, pour Lutte étagée ciblée, LOIC, pour Lutte orientée individuelle chenilles et les programmes seuils *sensu stricto* et qui sont détaillées ci-après. Une étude des risques liés aux procédés d'échantillonnage a été réalisée à cette occasion. Elle a confirmé que le nombre de 60 plants à observer par parcelle cultivée (nombre retenu au Bénin), au lieu des 25 plants généralement observés dans les autres pays, permettait d'avoir une meilleure précision de l'échantillonnage (Vodounnon *et al.*, 1996).

Programme LEC

Le programme LEC a été élaboré au Cameroun (Deguine *et al.*, 1993 ; Deguine et Ekukole, 1994) à partir d'un programme dose-cadence consistant à appliquer de façon calendaire, toutes les deux semaines (quatorze jours d'intervalle entre deux traitements), un ou des produits issus du programme recommandé, mais utilisés à la moitié de leur dose (programme de base, figure 98). Il s'agit d'une mesure considérée comme un « filet de sécurité » (ou « filet de protection ») destiné à éviter tout risque d'accroissement des populations de ravageurs et de dégâts en cas d'absence de suivi de la parcelle au septième jour suivant l'application calendaire.

L'emploi de seuils d'intervention intervient sept jours après le traitement du programme de base. Dans le cas où l'un des seuils est dépassé pour les principaux groupes (chenilles carpophages ou phyllophages, pucerons, aleurodes, acariens,

jassides), une demi-dose complémentaire est alors appliquée avec un produit considéré comme plus spécifique vis-à-vis du groupe (bidons de couleurs différentes) (figure 98).

Le programme consiste donc à ajuster les produits appliqués et leurs doses, selon deux niveaux ou « étages » de protection :

- un premier niveau, assuré par le programme calendaire mentionné (avec des demi-doses) ;
- un second niveau assuré par une application complémentaire « ciblée », car réalisée également avec des demi-doses, mais avec des produits ayant une action plus sélective sur les ravageurs dont le niveau de population ou de dégâts a dépassé le seuil.



Figure 97. Observation des ravageurs à l'aide d'une planchette (*pegboard*) (Bénin, Savalou, octobre 1994)

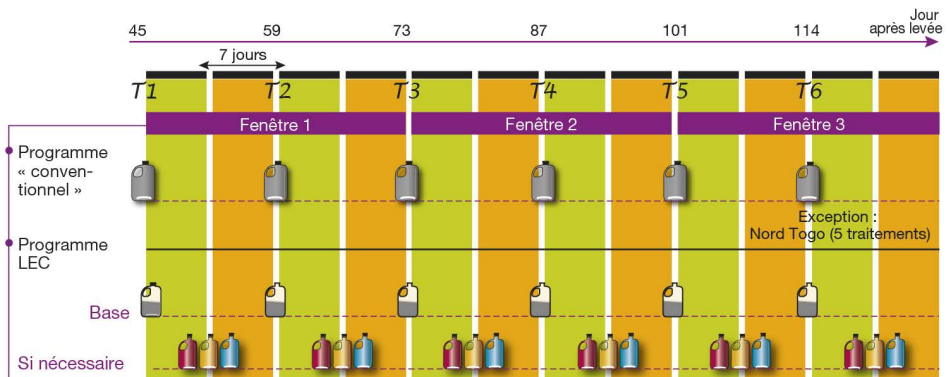


Figure 98. Représentation schématique d'un programme LEC. Source : Silvie *et al.*, 2011

La lutte étagée ciblée a été mise en pratique au Bénin, au Togo, en Côte d'Ivoire, au Sénégal, au Mali, sous des formes toutefois variables, en raison notamment de difficultés ou de crainte d'adoption directe des seuils *sensu stricto* avec des erreurs. Au Bénin, les programmes LEC ont été expérimentés de 1993 à 1998 sur près de 1300 hectares répartis sur douze sites dans deux régions différentes. Deux villages ont mené leur expérimentation, Kpakpavissa (430 ha) et Sirarou (130 ha). Dans ce dernier village, les producteurs ont confectionné eux-mêmes, pour les membres de leur communauté, les planchettes à chevilles employées pour faciliter les échantillonnages au champ (figure 97). La quantité de matières actives économisée était de 20 % à 40 % (Vodounnon *et al.*, 1996). Dans ce pays, cette pratique de protection du cotonnier a fait l'objet d'adaptations particulières selon le complexe de ravageurs présents dans les différentes régions phytosanitaires (voir section «La diversité taxinomique des espèces d'insectes», chapitre 2), à savoir avec ou sans la présence des chenilles à vie endocarpique (*T. leucotreta*, *P. gossypiella*, *M. nigriovenella*) (Silvie *et al.*, 2013a).

Le succès de ces opérations a entraîné la recherche nationale à élaborer un projet d'amélioration et de diversification des systèmes d'exploitation (PADSE) destiné à étendre l'application de ces programmes à une plus grande échelle (50 000 ha²³). Le projet a été financé par l'Agence française de développement (AFD).

Les programmes LEC ont été également menés avec succès au Mali et au Cameroun, sur des surfaces de plusieurs milliers d'hectares (Michel *et al.*, 1999; Silvie *et al.*, 2000).

Deux synthèses ont été publiées sur le sujet, avec une comparaison établie entre les différents pays et les valeurs de seuil retenues (Silvie *et al.*, 2001 et 2013a).

Comparés au coton biologique et au programme conventionnel, et analysés avec des critères économiques, les programmes LEC vulgarisés au Bénin ont été considérés comme une bonne option de protection contre les ravageurs (Matthess *et al.*, 2005).

Programme LOIC

Au Cameroun, la situation entomologique, caractérisée par la prépondérance de *Helicoverpa armigera* devenue la seule espèce d'importance économique observée, a conduit les chercheurs du Cirad à instaurer un programme simplifié appelé LOIC (Lutte orientée individuelle chenilles) prenant en compte les seuils liés aux seules chenilles s'attaquant aux organes.

L'échantillonnage adopté était de type séquentiel, les comptages étant arrêtés, et la décision de traiter prise dès que le seuil était dépassé et avant même la fin de l'observation de tous les plants programmés. Dans le but de faciliter le travail

²³ Compte tenu des difficultés et des contraintes liées à la formation des producteurs et à l'enca-drement des pratiques de la LEC, seuls 18 000 hectares ont pu être ensuite protégés avec ce type de programme (Patrick Prudent, communication personnelle).

aux producteurs, l'échantillonnage était réalisé également avec une planchette à chevilles, d'un autre format toutefois que celles employées dans les autres pays (Brévault *et al.*, 2009).

Programmes seuils *sensu stricto*

La protection des cultures de cotonniers sur la base de la seule utilisation des seuils d'intervention *sensu stricto* a été étudiée au Togo de 1988 à 1991, avec des expérimentations sur de grandes parcelles, destinées à adapter cette pratique aux conditions locales puis à la mettre en pratique au niveau des producteurs (Silvie et Sognibe, 1993). Très peu de différences furent mises en évidence entre les deux programmes comparés (applications sur seuils et programme recommandé).

Le Mali est le seul pays ayant continué à employer un programme d'applications d'insecticides conditionnées par le dépassement des seuils *sensu stricto*²⁴, avec 15 100 hectares ainsi protégés en 2008 sur les 521 000 cultivés, soit 3 % (Diarra *et al.*, 2020), mais 10 % des superficies cultivées en 2010 (Brévault *et al.*, 2019).

Les programmes de protection développés dans les pays d'Afrique subsaharienne montrent que l'adoption des seuils est techniquement possible dans les différents contextes locaux. Il faut noter toutefois que, lorsque la décision de traiter est prise, le traitement est réalisé avec des formulations de synthèse le plus souvent importées. Le caractère limité de ces programmes doit donc être souligné, d'autant que différentes méthodes pour la protection des cultures sont presque toujours disponibles et donc utilisées dans la pratique. Combiner des méthodes découle de la stratégie de protection intégrée décrite au chapitre 5. Les modalités d'adoption de telles combinaisons de méthodes sont présentées dans le chapitre qui suit.

²⁴ Les dernières informations fournies par la Compagnie malienne des textiles signalaient toutefois que dans les villages ayant adopté le programme sur seuils *sensu stricto*, un premier traitement obligatoire était demandé au 45^e jour après la levée.

Chapitre 8

Autres méthodes adoptées pour la protection du cotonnier

La protection contre les ravageurs du cotonnier revêt bien des aspects dans le monde et il est impossible de disposer d'une vision instantanée complète de ce qui se passe réellement dans chaque pays, à grande échelle. Pour tenter de disposer d'une vision panoramique, il est possible de s'appuyer sur les sources d'informations que représentent les travaux publiés à proprement parler, ainsi que sur les guides et les manuels de conduite de la culture dans lesquels un chapitre est consacré à la maîtrise des ravageurs.

Les informations diffusées dans les réunions des réseaux régionaux²⁵ construits au sein de l'ICAC constituent une autre source utile pour actualiser les connaissances (sur les espèces envahissantes, par exemple). Dans le cas de l'Afrique de l'Ouest francophone, le Programme régional de production intégrée du coton en Afrique (PR-PICA) constitue le réseau de référence.

En dehors de la lutte chimique stricte avec des produits formulés de synthèse, les différentes pratiques adoptées à un niveau expérimental ou dans la réalité sont ici exposées. Elles peuvent être appliquées sur des surfaces très variables, allant de la petite à la grande exploitation, où la culture mécanisée est omniprésente, comme au Brésil. Dans le cas de faibles superficies conduites en culture manuelle, certaines des méthodes de protection en question peuvent être mises en œuvre au champ, sans nécessairement impliquer l'adoption de seuils d'intervention.

Adoption partielle de la lutte biologique ou de la régulation naturelle

La lutte biologique classique, par acclimatation d'insectes parasitoïdes provenant de leur aire de répartition géographique initiale, a été envisagée lorsque le ravageur a été introduit accidentellement, comme ce fut le cas de l'anthonome du cotonnier, au Brésil²⁶.

²⁵ Les réseaux existants : ALIDA (Latin American Association for Cotton Research and Development), ACRDN (Asian Cotton Research and Development Network), Interregional Cooperative Network on Cotton for the Mediterranean and Middle East Regions, SEACF (Southern and Eastern African Cotton Forum) (source : <https://icac.org/CommitteesandNetworks/CommitteesandNetworks?CommitteeTypeId=2&MenuId=55#dropdown-lvl1>).

²⁶ Sans succès dans ce cas-là (parasitoïde *Catolaccus grandis*, Hymenoptera, Pteromalidae, élevé au Brésil) (Bastos *et al.*, 2005).

La lutte microbiologique à l'aide de virus d'insectes a été abordée expérimentalement sur des superficies cotonnières conduites manuellement au Tchad, en 1985 et au Togo, en 1989, avec l'association d'une formulation du virus du lépidoptère *Mamestra brassicae* (Noctuidae) à de faibles doses d'un pyréthrianoïde (deltaméthrine, au Tchad, cyperméthrine, au Togo). Cette technique de « lutte conjuguée » n'a pas donné satisfaction vis-à-vis de *H. armigera* et a été abandonnée (Silvie *et al.*, 1993b). D'autres travaux avaient cependant été entrepris en Égypte, également sur des cultures cotonnières conduites manuellement. Visant l'espèce *Spodoptera littoralis*, le ravageur dominant dans ce pays, ils ont porté sur la caractérisation de différents virus entomopathogènes (McKinley *et al.*, 1989; Abol-Ela *et al.*, 1994; Fédière *et al.*, 1999 et 2003), sur l'estimation de leur infectivité et sur la multiplication du virus de la granulose (Abd-Alla *et al.*, 1997; Léry *et al.*, 1997). L'utilisation commerciale de virus entomopathogènes sur des exploitations cotonnières de grande superficie nécessite l'automatisation de leur production. Cette dernière est généralement réalisée par des entreprises privées (biofabriques) qui maîtrisent les processus complexes d'élevage industriel des chenilles, de contamination de celles-ci et de formulation du virus. Ainsi, en Australie, une préparation à base de virus de polyédrose nucléaire — NPV²⁷ de *H. armigera* — est proposée comme moyen de lutte microbiologique contre les Heliothinae, *H. armigera* et *H. punctigera* (Fitt, 2000; Gregg *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2018). Une formulation à base de virus est également disponible pour traiter les chenilles de *S. frugiperda*. La lutte biologique par inondation (dite aussi « par augmentation ») est réalisée lorsque le nombre d'espèces de ravageurs à maîtriser est très faible, voire unique, comme cela était le cas en Ouzbékistan²⁸ où *H. armigera* est le principal problème rencontré (Matthews, 1993). Elle repose dans ce cas sur la production, dans les fermes collectives (kolkhozes), de parasitoïdes d'œufs (trichogrammes) ou d'un hyménoptère du genre *Bracon* puis sur leur libération massive (Eschanov et Namazov, 2021). Notons qu'une grande connaissance des conditions de diapause des différents insectes appliqués est alors nécessaire afin de mettre en adéquation les cycles du ravageur et de son parasitoïde.

Dans le cas du Pérou, qui a produit 712 tonnes de fibre certifiée biologique en 2019-2020, une liste de pratiques répondant à la stratégie d'IPM avait été établie dès 2003 par Lazo *et al.* Une partie d'entre elles relevant de la lutte biologique par augmentation concernait les ennemis naturels des ravageurs car, dans ce pays, les laboratoires maîtrisent les élevages de différents insectes prédateurs tels que les chrysopes, les coccinelles, les punaises. Un *Programa nacional del control biológico* (PNCB) est assuré par le Senasa (Servicio nacional de Sanidad Agraria²⁹ à l'université de la Molina).

²⁷ Produit commercial VivusMax®, en Australie. Heligen®, Bolldex® en Afrique du Sud et Helitec® au Kenya constituent d'autres formulations de virus de la polyédrose nucléaire de *H. armigera*.

²⁸ Il est difficile de disposer d'éléments récents sur les pratiques encore adoptées.

²⁹ www.senasa.gob.pe.

Employer une méthode de lutte biologique nécessite qu'il n'y ait pas de parcelles contiguës sur lesquelles sont appliqués des produits chimiques. Une telle exigence peut soulever certaines difficultés; elle implique en effet une délimitation à la fois dans l'espace, à une échelle territoriale, et dans le temps, avec des rotations d'autres cultures, également sous protection biologique afin d'éviter toute contamination par des produits chimiques. De nombreux cas d'échecs ont ainsi été rapportés par Kranthi et Russell (2009).

La lutte biologique par conservation (ou *conservation biological control*) a été largement préconisée; elle consiste à maintenir ou à renforcer l'action des ennemis naturels (principalement les organismes prédateurs et les parasitoïdes) tout au long de l'année. Son exploration a fait l'objet de nombreux travaux, en général dans les pays où la question foncière est résolue. Au Brésil, une approche originale est proposée par Torres et Bueno (2018), qui rappellent, en association avec la lutte biologique par conservation et l'emploi d'insecticides sélectifs, la possibilité de sélectionner des agents de biocontrôle de type prédateur résistants aux insecticides.

Une autre approche également originale de renforcement de l'action des ennemis naturels de l'ordre des arthropodes a été réalisée en Australie. Le principe était d'effectuer, pendant le cycle cultural, une application foliaire d'aliments riches en protéines et vitamine B (*food spray*³⁰), à base de maïs et de levure de bière issue de déchets de brasserie (Mensah, 1996, 1997, 2002a et 2002b). La méthode a été commercialisée, mais son utilisation a été arrêtée lorsque la demande des producteurs de coton a chuté après l'adoption du cotonnier Bt en Australie (Matthews et Grundy, 2021). Un manuel détaillé sur cette méthode et sur les recettes mises au point a été édité (Williamson et Mensah, 2016). Cette pratique originale a été étendue au Bénin dans le cas de la culture de coton biologique (Mensah *et al.*, 2012) ainsi qu'en Éthiopie, avec utilisation d'ingrédients locaux à base de levure (Amera *et al.*, 2017).

Emploi de phéromones

Les recherches menées sur les phéromones sexuelles ou d'agrégation ont permis à plusieurs entreprises de synthétiser et de commercialiser des mélanges de molécules très attractifs pour les principales espèces d'intérêt économique. Les usages qui en sont faits peuvent être variables : suivi des captures de mâles de lépidoptères, dans une optique de simple détection de l'arrivée de l'espèce sur la culture ou d'alerte donnée pour la réalisation de traitements, confusion sexuelle grâce à une saturation de l'air ambiant par la phéromone, piégeage de masse avec destruction des individus capturés, détection de l'éventuelle présence d'une espèce exotique, autodissémination assistée d'agents pathogènes (voir section « Interactions plante-ravageurs-ennemis naturels », chapitre 10).

³⁰ Produit commercial Envirofeast® (produit par Rhône-Poulenc, en 1998).

Dans le cas du cotonnier, des formulations micro-encapsulées ont été étudiées au Malawi en vue de la confusion sexuelle de l'espèce régionale *Diparopsis castanea* Hampson (Marks *et al.*, 1981). Aux États-Unis, pour lutter contre les punaises Pentatomidae *Euschistus servus* (Say), *Nezara viridula* (L.) et *Chinavia* (= *Acrosternum*) *hilare* (Say), Tillman *et al.* (2015) ont combiné le piégeage par des phéromones attirant les mâles avec une barrière physique préalablement mise au point, à base de polypropylène de vingt-trois mètres de large, placée entre une culture d'arachide, source des punaises et les cotonniers voisins (Tillman, 2014). Cependant, les études et les applications les plus nombreuses ont concerné l'espèce *P. gossypiella* et sa phéromone appelée *gossyplure* (Campion *et al.*, 1989). De nombreux travaux lui avaient été ainsi consacrés en Inde à la fin des années 1980. Depuis, l'intérêt de l'usage de la phéromone a été récemment ravivé, en raison du développement de la résistance des chenilles de cette espèce aux toxines de *B. thuringiensis* produites par les cotonniers transgéniques cultivés.

Pour la surveillance (*monitoring*) ou le piégeage de masse des mâles, le nombre de pièges disposés au champ est respectivement de cinq ou de quarante par hectare. Au Brésil, une densité de vingt pièges par hectare était toutefois mentionnée par Mafra-Neto et Habib (1996). Les captures de masse sont également employées au Pérou, où le nombre de bouteilles à eau suspendues équipées de la phéromone est élevé dans les périmètres cultivés (Pierre Silvie, communication personnelle). Elles font également l'objet d'essais en Inde (Prasad, 2022).

Pour les autres espèces telles que les lépidoptères Heliothinae ou celles appartenant au genre *Spodoptera*, les phéromones sont utilisées pour la caractérisation des complexes présents et pour le suivi de la dynamique des adultes mâles dans les champs.

Quant à la confusion sexuelle, elle a été expérimentée en Égypte à l'aide des tubes flexibles de type PB-Rope L contenant la phéromone (Moawad *et al.*, 1991 et 1994; Critchley, 1991). Plus récemment, ces mêmes tubes flexibles sont disposés à raison de 150 à 300 tubes par hectare (Desai *et al.*, 2022). La technologie appelée SPLAT, pour *specialized pheromone and lure application technology*, est employée en Inde pour empêcher l'accouplement via la libération de molécules incluant la phéromone (Shrinivas *et al.*, 2019). Et, toujours dans ce même pays, la technologie appelée CREMIT, pour *controlled release emission mating interruption technique*, est considérée comme une approche viable à large échelle (Sreenivas *et al.*, 2022).

Associations de cultures et agroforesterie

L'association à des cultures d'autres plantes ainsi que l'agroforesterie sont des pratiques qualifiées d'agroécologiques. Ces pratiques ont pour but d'augmenter la diversité botanique ou la diversité faunistique aux fins d'une gestion améliorée des bioagresseurs ou de leurs ennemis naturels. Elles peuvent également apporter un bénéfice dans des domaines autres, comme la fertilité du sol, par exemple.

Elles sont exposées ici d'une manière assez détaillée, leur mise en application apparaissant *a priori* facile en comparaison avec d'autres pratiques nécessitant une forte technicité (cas de la production d'agents de biocontrôle), ou avec des applications ciblées faites à des moments précis.

Au sein d'un même champ ou en bordure de la culture principale, on peut agir sur la diversité botanique à travers la juxtaposition de cultures, ou d'une culture et d'autres plantes. On emploie alors soit des plantes plus attractives pour les ravageurs que la culture première, soit des plantes-barrières ayant un effet sur l'installation et le déplacement de ces derniers.

Dans le cas du cotonnier, un effet de barrière physique peut également être recherché par l'implantation d'espèces végétales de haute taille et de forte densité en bordure de champ. Cela se pratique en culture biologique sur de petites superficies, avec du maïs par exemple. Le choix des espèces plantées est crucial car il existe un risque de multiplier certains ravageurs sur la plante barrière, comme avec le maïs par exemple, connu comme hôte des lépidoptères Heliothinae (*H. armigera*, *H. zea*).

Une combinaison de plantes attractives et de plantes-barrières est possible, comme dans le cas de *Bemisia tabaci*, en Chine (Zhang *et al.*, 2020).

Certaines plantes — le terme « plante-piège » est alors employé — attirent les adultes de ravageurs tout en ne permettant pas le développement de leurs stades immatures. Cette propriété peut être exploitée, sachant qu'elle nécessite un effort d'observation intense pour bien connaître la biologie du ravageur visé. Ainsi, en Ouganda, où la punaise Miridae *Lygus vosseleri* avait été préalablement bien observée dans son milieu naturel, Stride (1969) a pu étudier trois années consécutives, de 1965 à 1967, l'effet de *Cissus adenocaulis* comme plante-piège de ce ravageur.

Les ravageurs, stades larvaires ou adultes, présents sur des plantes attractives ou des plantes-pièges, peuvent être éliminés par des traitements (Mueller et Stern, 1974) ou une récolte. L'exemple classiquement cité dans ce dernier cas est celui de la luzerne, cultivée en bordure de champs de cotonniers pour attirer les punaises du genre *Lygus*, et régulièrement récoltée, ce qui permet à ces insectes de se reporter sur de jeunes pousses de luzerne (Stern *et al.*, 1969; Sevacherian et Stern, 1974; Parker *et al.*, 2013).

Notons enfin, à propos de plante-piège, qu'il s'agit d'une question de point de vue. En effet, dans le cas des lépidoptères *H. armigera* ou du genre *Earias*, le cotonnier peut lui-même être considéré comme une plante-piège pour les producteurs de gombo, *A. esculentus* (Malvaceae, comme le cotonnier) (Ratnadass *et al.*, 2014).

Les associations de cultures présentent également l'intérêt d'entretenir ou d'augmenter la diversité faunistique. En attirant ou en maintenant les ravageurs visés sur des plantes situées à côté ou en dehors de la culture principale, elles peuvent en effet entretenir des populations d'ennemis naturels susceptibles de se déplacer vers les proies — ou les hôtes, pour les espèces parasitoïdes — présentes sur les cotonniers voisins (lutte biologique par conservation).



Figure 99. Culture associée de cotonniers avec le haricot *mung bean*, *Vigna radiata* (Bangladesh, septembre 2009). Crédit photo : Fakhre Alam Ibne Tabib.



Figure 100. Culture associée de cotonniers avec du soja (desséché ici), au sud du Viêtnam (province de Dong Nai, 1991). Crédit photo : Guy Trébuil.

Le cas particulier des associations ou de l'assolement avec des cotonniers transgéniques est traité dans la section « Cotonniers Bt : un avenir à construire avec précaution » (chapitre 9). Celui des couverts végétaux employés dans le cas de la pratique du semis direct sous couverture végétale est rapporté dans la section « Étudier ou approfondir le rôle de la diversité végétale » (chapitre 9).

Curieusement, la revue récente des associations de cultures faite par Lv *et al.* (2021) ne mentionne pas le cas du cotonnier, alors que de très nombreuses associations sont recensées dans le monde pour cette culture. Quelques exemples tirés de la littérature sont donnés ci-après pour faire état d'expérimentations dans ce domaine ou de situations rencontrées dans des exploitations.

Les associations sont de nature diverse, pour ce qui est de la configuration dans l'espace ou dans le temps.

- Cultures intercalaires simples (une ou deux lignes d'une autre culture sont semées entre une ou plusieurs lignes de cotonniers) : au Bangladesh avec le haricot de l'espèce *Vigna radiata* (figure 99, Tabib *et al.*, 2014), au Viêt Nam avec le soja (figure 100), ou au Paraguay avec diverses plantes cultivées dans le cas de la culture de coton biologique (figure 101).
- Bandes de plusieurs mètres d'une autre culture (*strip intercropping*, en anglais) semée entre des bandes de cotonniers : cela est pratiqué aux États-Unis avec le sorgho ou la luzerne (Fye, 1971 et 1972 ; Stern *et al.*, 1967 ; Greenberg *et al.*, 2012 ; Greenberg et Parajulee, 2017), en Australie avec la luzerne (Mensah et Khan, 1997 ; Mensah, 1999 et 2002b ; Mensah et Sequeira, 2004), à Madagascar avec le sisal (Crétenet *et al.*, 1970), en Chine avec le blé (Zhang *et al.*, 2007).
- Bandes de plusieurs mètres de deux cultures différentes, dont celle du cotonnier, alternées chaque année avec, par exemple, l'arachide, d'où les appellations en anglais de *alternate* ou *wide-strip* ou encore de *transposition intercropping* (Chi *et al.*, 2019 ; Lv *et al.*, 2023).
- Superposition de semis décalés dans le temps (*relay intercropping*, *rotation-intercropping*, en anglais) (Ouyang *et al.*, 2020) avec un semis des cotonniers :
 - entre des lignes d'une autre culture ou des plants de cette culture sur la même ligne, comme dans le cas du maïs au sud du Togo, où les deux saisons des pluies permettent cette pratique (figure 102) ;
 - dans des espaces laissés non cultivés entre les lignes de la première culture, comme dans le cas de très nombreuses associations recensées en Chine (Dai et Dong, 2014 ; Chi *et al.*, 2021) (figures 103 à 105).

Considérant le contexte de la réduction de l'usage des insecticides de synthèse, les effets de telles associations de cultures sur les ravageurs (réduction sur le cotonnier, détournement sur une autre plante) ou sur leurs ennemis naturels (maintien ou renforcement de leurs populations) ont été mis en évidence pour les pucerons (Fernandes *et al.*, 2012 et 2018) et leurs ennemis naturels (Corbett *et al.*, 1991 ; Parajulee *et al.*, 1997 ; Phoofolo *et al.*, 2010 ; Devi *et al.*, 2020), ainsi que pour des punaises de la famille des Miridae (Stern *et al.*, 1964 ; Godfrey et Leigh, 1994 ; Mensah et Khan, 1997 ; Li *et al.*, 2019). Il est à noter que les situations diffèrent selon la dimension des champs exploités.



Figure 101. Culture de cotonniers en agriculture biologique : association avec l'ananas et la banane (Paraguay, Calle 4000, mars 2006)



Figure 102. Culture du cotonnier cultivée en dérobée, après le maïs (Togo, Agbatitoe, septembre 1990)



Figure 103. Culture associée du cotonnier avec la pomme de terre, en Chine (Hebei, comté de Quzhou, juin 2015).
Crédit photo : Ren Jinghe.



Figure 104. Culture associée du cotonnier avec l'oignon, en Chine (Hebei, comté de Quzhou, juin 2015). Crédit photo : Ren Jinghe.

8. Autres méthodes adoptées pour la protection du cotonnier



Figure 105. Culture associée du cotonnier avec l'arachide, en Chine (Liaoning, juin 2014).
Crédit photo : Xu Min.



Figure 106. Culture associée du cotonnier avec le blé (*relay intercropping*) en Chine (Xianjing, juin 2011). Crédit photo : Lizhen Zhang.

Cas des petites exploitations

Sur le continent africain, les essais d'associations avec le cotonnier concernent davantage les pays anglophones ou lusophones et la culture de coton biologique. Les exemples relevés concernent des pratiques restées souvent au stade expérimental.

En Tanzanie, Kabissa *et al.* (1997) signalent des associations avec le maïs, le tournesol et le haricot, cela malgré l'interdiction faite par la loi de cultiver des plantes alimentaires au sein de la culture cotonnière.

En Ouganda, Epieru (1997) a étudié durant deux années (1993 et 1994) l'effet de l'association avec le haricot (*Phaseolus vulgaris*), le maïs ou le sorgho, sur l'incidence des prédateurs (araignées, forficules, fourmis, coccinelles). Malheureusement, comme dans de nombreuses études de ce type réalisées à cette époque, l'effet sur le rendement, qui pourtant intéresse en premier lieu l'agriculteur, n'est pas mentionné.

En Égypte, et pendant une seule année, Schader *et al.* (2005) ont étudié l'association avec le basilic (*Ocimum basilicum* L.). Si une réduction de 50 % des capsules attaquées par le ver rose, *P. gossypiella*, a été observée, il n'a pas été obtenu une augmentation significative de rendement de coton-graine.

Au Mozambique, Chamuene *et al.* (2007a et 2007b) ont analysé — au moyen de dispositifs de petite taille — les effets de l'association (*strip cropping*) du cotonnier (huit rangées de 10 mètres de long, écartement de 0,90 mètre entre les lignes) avec le maïs (deux rangées), le sorgho, la crotalaire (*Crotalaria ochroleuca*, Fabaceae) et *Cajanus cajan* (Fabaceae). De son côté, De Sousa (2007) s'est prioritairement intéressé au maïs. Des traitements visant *H. armigera* sur le cotonnier étaient réalisés, sur seuil économique d'intervention ou sur la base d'un calendrier de traitements préétablis. Constituant une priorité pour les agriculteurs, le rendement en coton-graine était utilisé avec, comme indicateur de l'efficacité de cultures associées ou non, l'indice *land equivalent ratio* (LER) (Mead et Willey, 1980). Pour une culture donnée, si cet indice est supérieur à 1, cela signifie que la culture est plus productive en association qu'en monoculture, en matière de rendement à l'hectare. Dans le cas du Mozambique et avec l'association avec le maïs, cet indice était de 1,36 lorsque le traitement sur seuil d'intervention était appliqué. Chamuene *et al.* (2007b) ont cependant indiqué que la pression exercée par les autres chenilles de *Diparopsis castanea* et *P. gossypiella* était faible au cours de la campagne d'étude (2005-2006).

Sur le continent asiatique, les exemples sont plus nombreux : en Inde notamment, où la culture du coton biologique est économiquement très importante, de nombreuses combinaisons ont été décrites (Sankaranarayanan *et al.*, 2011).

Dans le cas de la Chine, où une partie des opérations culturales peut être mécanisée, la pratique d'une association décalée dans le temps entre le blé et le cotonnier est connue pour favoriser une meilleure gestion des populations de pucerons (Lin *et al.*, 2003 ; Zhang *et al.*, 2004 ; Men *et al.*, 2004 ; Ma *et al.*, 2006 ; Ouyang *et al.*, 2012) (figure 106). La rotation et l'association blé-maïs-coton permettent d'augmenter la population de la coccinelle *Propylea japonica* et ainsi de réduire les populations de pucerons (Ouyang *et al.*, 2020).

Cas des grandes exploitations

Les reports de faune d'une autre plante vers le cotonnier — ou dans le sens inverse — ont été démontrés dans le cas d'espèces nuisibles comme les punaises du genre *Lygus* aux États-Unis (voir ci-dessus). En Australie, Mensah et Khan (1997) ont établi des bandes de cultures d'intérêt économique comme la luzerne ou le sorgho pour gérer les populations du Miridae *Creontiades dilutus* (Stål). Au sud du Brésil, dans l'État du Paraná, de nombreuses punaises phytophages sont susceptibles de passer du soja au cotonnier.

Des mouvements d'insectes prédateurs ont également été démontrés du sorgho vers le cotonnier, au Texas (Prasifka *et al.*, 1999, 2004a et 2004b).

Dans tous les exemples donnés, il est noté qu'une connaissance approfondie de la biologie des ravageurs est nécessaire, notamment en ce qui concerne le rôle des différentes plantes-hôtes sur leurs cycles de vie. Le cas des punaises aux États-Unis et en Australie (Fleischer et Gaylor, 1987; Whitehouse, 2011) est, de ce point de vue, particulièrement démonstratif. Il serait pertinent de disposer de telles connaissances pour le continent africain.

Agroforesterie

La culture du cotonnier en agroforesterie a été expérimentée au Bangladesh, où des arbres d'une espèce d'usage médicinal, *Embllica officinalis* Gaertn. (Euphorbiaceae), ou des arbres fruitiers ont été plantés en ligne (Mortuza *et al.*, 2014; Uddin et Mortuza, 2015) (figure 107). Les effets potentiels sur la faune auxiliaire n'ont pas été précisés.

Zhang *et al.* (2015) ont montré en Chine l'intérêt de la plantation de peupliers résistants génétiquement aux insectes (plants produisant la protéine CryIAc et l'inhibiteur de protéase API). Dans ce même pays, de plus faibles populations des ravageurs suivants ont été constatées dans le cas de l'association avec l'abricotier : *Lygus pratensis* (L.), *Thrips tabaci* Lindeman et *Acyrtosiphon gossypii* Mordvilko (voir la référence en chinois donnée dans Chi *et al.*, 2021).

Toutefois, des effets négatifs ont pu être observés sur la culture d'arbres fruitiers ou sur le cotonnier cultivé dans l'interligne lui-même. Ainsi, dans la province du Xinjiang, l'association avec le jujubier (figure 108) a vu les populations d'acariens phytophages augmenter sur le cotonnier (Li *et al.*, 2018), voire sur les deux cultures (Li *et al.*, 2020).

Les associations de cultures avec le cotonnier sont prometteuses, mais nécessitent d'être définies avec précision en fonction du contexte et des ravageurs visés. Elles nécessitent également d'utiliser une partie de la sole destinée à la culture du cotonnier, ce qui peut aller à l'encontre des pratiques locales auxquelles sont habitués les agriculteurs disposant de faibles superficies.



Figure 107. Culture du cotonnier en agroforesterie avec l'espèce d'Euphorbiacées *Phyllanthus emblica* L. (aonla) (Bangladesh, Bangabandhu Sheikh Mujibur Rahman Agricultural University, Salna, Gazipur, 2009). Crédit photo : Gazi Golam Mortuza.



Figure 108. Culture du cotonnier en agroforesterie avec le jujubier (*Ziziphus jujuba* Miller, Rhamnaceae) (Chine, Xinjiang, 2020). Crédit photo : Wan Sumei.

Les seuils en cultures mécanisées

L'emploi de seuils chez les agriculteurs cultivant le cotonnier sur de petites superficies a été décrit dans la section « Programmes de protection avec seuils » (chapitre 7). Souvent définis de façon empirique, ils font appel à un échantillonnage réalisé sur une trentaine de plants par hectare ou un peu moins, à l'aide de planchettes. Des études approfondies, qui s'ajouteraient à celle menée par Gozé *et al.* (2003) dans le cas de *H. armigera*, seraient nécessaires pour vérifier le bien-fondé de telles pratiques.

Dans les exploitations de type industriel conduites en culture mécanisée, en Australie, aux États-Unis, au Brésil, l'utilisation de seuils d'intervention est également préconisée avec des modalités d'échantillonnage bien différentes de celles employées chez de petits producteurs.

À titre d'exemples, le tableau 8 rapporte les modalités d'échantillonnage et les seuils définis dans le cas des espèces d'Heliothinae (*H. armigera*, *H. zea*, *Chloridea* [= *Heliohis*] *virescens*).

Tableau 8. Modalités d'échantillonnage et seuils recommandés ou appliqués dans le cas de *H. armigera* en cultures cotonnières à grande échelle

| Pays | Période du cycle | Observation recommandée | Seuils recommandés | Références |
|-----------------------------|--|--|---|------------|
| Australie (Coton non-Bt) | | 60 plants/100 ha (2 à 3 fois/semaine) | 1-2 larves/m linéaire ou 5 œufs marrons/m | (1) |
| | | | 10-20 larves /100 plants | |
| | Plantule à floraison | 30 plants/50 ha ou 3 m linéaires séparés/50 ha (2 fois/semaine) | 2 larves/m ou 1 larve > 8 mm/m | (2) |
| | Floraison jusqu'au <i>cut-out</i> * | idem ou 5 œufs marrons/m | | |
| | <i>Cut-out</i> à 15 % capsules ouvertes | 3 larves/m ou 1 larve > 8 mm/m ou 5 œufs marrons/m | | |
| | 15 % à 40 % capsules ouvertes | 5 larves/m ou 2 larves > 8 mm/m ou 5 œufs marrons/m | | |
| (Coton Bt) | lors de 2 observations consécutives | 2 larves > 3 mm/m ou 1 larve > 8 mm/m | | (2) |
| Brésil | | 200 points d'observation/UBD | 5-8 larves/100 plants (<i>H. armigera</i> ou <i>H. zea</i>) | (3) |
| | jusqu'à 40 JAE | 3-5 plants/point d'observation | | |

Tableau 8. (suite)

| Pays | Période du cycle | Observation recommandée | Seuils recommandés | Références |
|----------------------|------------------|---|--|------------|
| Brésil | après 40 JAE | 1 plante entière/point tous les 3 à 5 jours selon la phénologie ou la sensibilité à la virose | % plants infestés par au moins 1 larve | |
| | | | 10-40 % boutons floraux infestés par des larves selon la phénologie de la plante ou 50-200 larves/100 plants | (1) |
| États-Unis | | 100 structures terminales et organes fructifères (1-2 fois/semaine) | 4-20 % plants infestés par une larve | (1) |
| | | | 5-25 % boutons floraux attaqués | |
| (Californie) | | 4-20 larves/100 plants | | |
| | | 5 plants consécutifs x 20 points d'observation = 100 <i>terminals</i> par champ | 20 jeunes larves/100 plants/champ | (4) |
| (San Joaquin Valley) | | 100 <i>terminals</i> au moins (5 x 20 points) | 20 jeunes larves/100 plants si le champ a été traité avant; sinon, 8 jeunes larves/100 plants | (5) |
| (Desert valleys) | | 100 plants choisis au hasard | 10 à 12 jeunes chenilles | (5) |
| | | 25 plants/quart = 20 acres | <i>H. zea</i> ou <i>H. virescens</i> /100 plants | |

Légendes : UBD = unité de base pour les décisions (15 à 50 ha); JAE = jours après émergence; *terminals* = apex des cotonniers. * *cut-out* : durée de la période entre l'apparition de la première fleur et l'arrêt de la croissance du plant de cotonnier.

Références : (1) Luttrell *et al.*, 1994; (2) CRDC, 2022; (3) Bélot *et al.*, 2020; (4) Hake *et al.*, 1996; (5) University of California, 2015.

Sur les grandes exploitations, l'échantillonnage est fait à l'aide d'outils numériques (tablettes, téléphones) et informatiques permettant la notation directe au champ avec le relevé de la position de la plante observée, puis la prise de décision de traitement au retour du champ. Au Brésil, le nombre de personnes (*pragueros*) initialement chargées de l'observation des ravageurs et de leurs dégâts a ainsi été réduit; elles sont devenues aujourd'hui des agents multitâches pouvant traiter les informations après les relevés et réaliser rapidement, si nécessaire, les opérations de traitements terrestres.

Chapitre 9

Mise en pratique des stratégies : difficultés et défis à relever

Destinée à se traduire par une réduction de l'usage des insecticides de synthèse, la lutte intégrée a suscité un espoir légitime et une multitude de travaux lui ont été consacrés. Si l'on considère la culture du coton, la réalité est qu'aujourd'hui la plupart des divers programmes qui avaient pourtant été adoptés par les producteurs de coton sur des superficies nationales importantes ont été abandonnés. On ne dispose malheureusement pas de nouvelles données depuis la synthèse de Silvie *et al.* (2013a), mais des informations sont toutefois rapportées dans les réunions du réseau PR-PICA.

Une telle situation s'explique par les difficultés rencontrées à différents niveaux dans la mise en pratique des seuils d'intervention, de la gestion des cotonniers Bt, de la combinaison des méthodes de lutte et dans la mise en œuvre de la dimension spatiale de la gestion des ravageurs.

Difficultés de définition ou d'application des seuils

Plusieurs niveaux de seuils ont été définis : un seuil entraînant des pertes économiques (*economic injury level* ou EIL) et un seuil d'action (*action threshold level* ou ATL) inférieur à EIL et utilisé afin de ne pas atteindre ces pertes. Le type de seuil adopté n'est pas toujours précisé dans la littérature ou dans les manuels de recommandations. La définition de ces seuils entraîne plusieurs difficultés liées à la quantification des pertes par espèce de ravageur ou à la biologie particulière de certaines d'entre elles. Pour le cotonnier, la possibilité de compenser³¹ les pertes d'organes du début de cycle, notamment en Afrique, représente un autre facteur de complexité. Le seuil économique étant lié par ailleurs au coût de la fibre sur le marché international, il peut théoriquement varier d'une année à l'autre.

Des seuils variables peuvent être appliqués selon la période du cycle cultural et selon le type de cultivar de cotonnier (Bt ou non-Bt). Mais ils ne semblent adoptés que dans le cas des grandes exploitations (tableau 8). Sterling *et al.*, qui avaient signalé dès 1996 ces limites dans l'emploi de seuils économiques d'intervention, préconisaient de fait l'emploi de seuils dynamiques tenant compte de toutes les connaissances.

³¹ Le phénomène de compensation, par la mise en place de nouveaux organes fructifères, peut survenir dans le cas des variétés à cycle indéterminé, dès lors que la pluviométrie est favorable en fin de cycle.

Difficulté de quantifier les pertes liées à chaque ravageur

L'établissement de seuils nécessite une bonne connaissance de la biologie des ravageurs, ainsi que de leur écologie et de l'importance économique de leurs dégâts. Au laboratoire ou en serre avec des cotonniers poussant dans des pots, il est possible de quantifier les pertes liées à un seul insecte et de le relier à un niveau d'infestation. Au champ, la situation est beaucoup plus complexe du fait de la présence simultanée de plusieurs espèces. Des tentatives de caractérisation des pertes ont été menées en Afrique francophone à l'aide de parcelles dites « filtres » : en partant de l'hypothèse que certaines familles d'insecticides étaient sélectives d'un groupe de ravageurs (acaricides, pyréthrinoïdes visant les chenilles, organophosphorés employés contre les insectes piqueurs-suceurs), on appliquait le produit *ad hoc* pour réduire, voire éliminer le ravageur voulu. Une difficulté s'ajoute dès lors que l'on souhaite évaluer les pertes dues à des espèces qui ne s'attaquent qu'aux capsules vertes, des insectes à biologie « cachée » (chenilles endocarpiques). Il y a alors la nécessité d'une protection antérieure des plants pour disposer des organes vers la fin du cycle. Les résultats obtenus n'ont pas permis de montrer clairement les effets de chaque groupe d'insecticides, car la sélectivité des matières actives est toute relative.

Difficulté de définir certains seuils

Des seuils d'intervention ne sont pas adoptés en cas de protection préventive, souvent effectuée pour limiter les risques, notamment dans le cas des espèces, assez nombreuses, dont la présence, les dégâts, ou leur possible faculté à transmettre des virus pathogènes sont mal anticipés. Ainsi, dans le cas des coléoptères qui entrent dans la culture à partir des zones naturelles encadrant le champ, tels que la *broca*, *Eutinobothrus brasiliensis*, les agriculteurs brésiliens, dans l'État du Paraná, effectuent un traitement préventif de bordure. Le traitement des semences est une autre modalité d'application préventive d'insecticides adoptée pour limiter les populations des coléoptères *Syagrus calcaratus*, des pucerons ou des aleurodes. L'application préventive d'insecticide effectuée le long de la ligne de semis (technique dite de *side-dressing*, en anglais) est un autre exemple pour lutter contre les thrips. De nouveau au Brésil, des traitements aériens de bordure de champ peuvent être déclenchés dès que l'anthonome est capturé dans les pièges à phéromones disposés autour des grandes parcelles. Notons que, d'une manière générale, les observateurs des fermes agricoles connaissent le champ où vont se manifester les premières infestations de l'anthonome.

La définition rigoureuse des seuils implique également que le praticien, l'agriculteur ou le consultant prennent en compte l'évolution des marchés économiques internationaux (prix de la fibre) ou des intrants insecticides. À titre d'exemple, une formule est proposée dans le cas du seuil économique de *H. armigera* sur le sorgho (AgBiTech³²). Elle est destinée à déterminer si une application de la formulation virale Vivus Max est économiquement intéressante.

³² https://irp.cdn-website.com/caae7a98/files/uploaded/vivus-max_technical-manual.pdf.

Exprimé en nombre de chenilles par panicule, le seuil est calculé en divisant le quotient $C \times R$ par $(N \times V \times 2,4)$ sachant que C représente le coût du traitement (en dollars australiens par hectare), R , l'écartement entre les lignes (en mètre), N , le nombre de panicules de sorgho par mètre linéaire, V , le prix du grain (en dollars par tonne) et 2,4 le poids de sorgho perdu (en gramme par chenille). Des formules similaires n'ont cependant pas été introduites pour chaque ravageur du cotonnier.

Le défi : établir de nouveaux seuils d'intervention

Dans la majorité des cas, les seuils d'intervention ont été établis de manière empirique après une adaptation aux conditions locales. Ils font référence soit à une seule espèce de ravageur (*H. armigera*), soit à un groupe d'espèces ayant une même action de prélèvement sur le végétal, par exemple les chenilles phyllophages ou les chenilles carpophages ou encore les insectes piqueurs (pucerons, aleurodes). Il n'existe pas de seuils pour certaines espèces. Une détermination aussi rigoureuse que possible constitue un préalable indispensable à une utilisation aussi appropriée que possible, comme l'ont souligné Renou et Brévault (2016).

Des recherches gagneraient à être entreprises dans le but de définir un seuil « multiple », soit « pluriespèce », car une demande des producteurs, au Brésil notamment, est de pouvoir disposer de seuils prenant en considération une combinaison d'espèces, les insecticides employés ayant une action qui dépassent le plus souvent le seul groupe ou la seule espèce visés. Établir de tels seuils représente un véritable défi que, pour le moment, on n'a pas vraiment tenté de relever, même si des seuils regroupant les espèces de chenilles exocarpiques provoquant des dégâts sur les organes floro-fructifères ont été proposés. Sur le plan de l'approche expérimentale, il serait intéressant d'associer des combinaisons de niveaux différents de populations de chenilles, pucerons, aleurodes, acariens, pour estimer à chaque fois leurs impacts sur la production.

Enfin, on ne peut laisser de côté le fait que, jusqu'à présent, la prise en compte des niveaux de populations des ennemis naturels dans l'établissement des seuils a été très peu étudiée. Une approche originale intégrant les observations faites sur les ennemis naturels a été menée en Australie, où Mensah (2002a et 2002b) a calculé un ratio ravageurs/prédateurs. Le guide australien de la gestion des ravageurs du cotonnier (CRDC, 2022, page 28) préconise l'usage de ce ratio dans le cas des lépidoptères du genre *Helicoverpa*. Des insectes parasitoïdes et prédateurs sont dénombrés et le total est rapporté au nombre de chenilles et d'œufs du ravageur, amputé du nombre d'œufs parasités. En cas de ratio favorable aux ennemis naturels (c'est-à-dire un ratio égal ou supérieur à 0,5), la décision est prise de ne pas traiter la culture.

Il est difficile de connaître la proportion de producteurs utilisant réellement ce ratio. Rappelons que la mise en place de tels seuils de décision de « non-traitement » avait déjà été tentée aux États-Unis et au Brésil (Sterling, 1984 ;

Ramalho, 1994 ; Conway *et al.*, 2001). Aux États-Unis, Sterling (1984) et Conway *et al.* (2001) ont ainsi prôné l'inclusion de la présence des insectes prédateurs ou d'insectes morts de mycoses pour déterminer des niveaux d'inaction. Mais, à notre connaissance, il n'y a pas eu d'applications à large échelle, sans doute du fait des contraintes de réalisation.

Difficultés liées à l'adoption des cotonniers Bt

Niche écologique vacante, populations résistantes aux toxines

Si aujourd'hui, les variétés transgéniques de cotonniers représentent pratiquement 80 % de l'ensemble des variétés de cotonniers cultivées dans le monde, leur utilisation se révèle limitée, sinon inopérante dans certaines situations. L'intérêt de disposer de variétés uniquement résistantes à des chenilles s'avérait pourtant dès le départ limité. En outre, l'un des premiers intérêts avancés dans l'emploi des cotonniers Bt, à savoir la diminution de l'usage des insecticides, s'est avéré caduc, car le spectre des insectes attaquant le cotonnier est large et comprend des espèces non-cibles des toxines produites par la plante.

C'est le cas du Brésil où l'action de ravageurs autres que des lépidoptères, tels que l'anthonome, les pucerons, les acariens ou les aleurodes, exige de toute manière des applications insecticides. Dans de nombreux pays (Chine, États-Unis, Australie, Inde), de nouveaux traitements se sont révélés nécessaires contre des insectes occupant la niche écologique laissée vacante, comme les punaises de la famille des Miridae (Wu *et al.*, 2002 ; Bealmear et Bundy, 2006 ; Lu *et al.*, 2010 ; Lu et Wu, 2011 ; Udikeri *et al.*, 2011 ; Wilson *et al.*, 2013). Ces traitements supplémentaires ont entraîné une augmentation du coût de la protection, comme cela a été signalé en Chine (Wang *et al.*, 2008).

Par ailleurs, la résistance de certaines espèces de ravageurs du cotonnier visées par les toxines Cry1Ac et Cry2Ab a été signalée (Tabashnik *et al.*, 2013 et 2014 ; Tabashnik, 2015). Les cas de *H. armigera* et de *P. gossypiella* sont ainsi bien documentés, en Chine et en Inde (Zhang *et al.*, 2011 ; Dhurua et Gujar, 2011 ; Wan *et al.*, 2012 ; Tabashnik *et al.*, 2012 ; Naik *et al.*, 2018). Des cas de résistance à d'autres toxines ont également été démontrés chez d'autres lépidoptères ravageurs du maïs, comme *Busseola fusca* en Afrique du Sud ou *Spodoptera frugiperda* à Puerto Rico (Van Rensburg, 2007 ; Storer *et al.*, 2012). La réduction initialement constatée de l'usage des insecticides de synthèse n'a pas été vérifiée sur le long terme en Inde (Kranthi et Stone, 2020). Elle est cependant attestée en Australie par les graphes publiés par Wilson *et al.* (2018), ces auteurs attribuant en fait la baisse à une conjonction d'autres facteurs comme l'utilisation d'insecticides plus sélectifs. Il importe de considérer la spécificité d'action des toxines prises en compte dans les programmes de sélection. Ainsi, Cry1Ac se révèle très spécifique des lépidoptères, mais n'agit pas sur des espèces du genre *Spodoptera* comme *S. eridania* (Wan *et al.*, 2008). Il en est de même avec le Noctuidae *Chrysodeixis includens*, un ravageur

présent également sur le soja, au Brésil, ou avec de jeunes stades larvaires de *Chloridea* (= *Heliohis*) *virescens*, Lepidoptera, Noctuidae, par exemple. De ce fait, une certaine « course » à l'addition de gènes dans les mêmes plantes génétiquement modifiées (*pyramiding*, en anglais) a été constatée (Li *et al.*, 2014). Ces solutions, apportées par les firmes obtentrices des plantes ainsi transformées, visent à faire produire à ces plantes plusieurs toxines en même temps, pour qu'elles se combinent avec plusieurs sites récepteurs dans l'estomac des insectes ravageurs visés, retardant ainsi l'évolution de la résistance au champ. Le tableau 9 donne l'exemple de l'historique observé au Brésil selon trois types de cotonniers transformés avec la production des toxines initiales Cry1Ac, Cry1Ab et Cry2Ab2 et complétés ultérieurement par d'autres toxines (endotoxines Cry ou exotoxines Vip).

Tableau 9. Toxines de *Bacillus thuringiensis* présentes dans des variétés commercialisées au Brésil et années d'autorisation

| Toxines | Années |
|--------------------------|--------|
| Cry1Ac | 2005 |
| Cry1Ac + Cry1F | 2009 |
| Cry1Ac + Cry1F + Vip3A | 2017 |
| Cry2Ab2 + Cry1Ac | 2009 |
| Cry2Ab2 + Cry1Ac + Vip3A | 2016 |
| Cry1Ab + Cry2Ae | 2011 |
| Cry1Ab + Cry2Ae + Vip3A | 2018 |

Source : Comissão Técnica Nacional de Biossegurança, 2023.

La recherche sur les gènes d'intérêt et sur les toxines de Bt (Cry) se poursuit aux fins de créer des cotonniers résistants à des groupes d'insectes autres que celui des lépidoptères.

Ainsi, au Brésil, l'espoir de la création de variétés de cotonniers transgéniques résistants à l'anthonome est fondé sur des travaux commencés il y a de nombreuses années et qui ont abouti à l'emploi de la toxine Cry10Aa (Ribeiro *et al.*, 2017). Des gènes d'intérêt vis-à-vis des punaises *Lygus lineolaris* et *Lygus hesperus* ont également été découverts aux États-Unis depuis plus de dix ans déjà (Baum *et al.*, 2012; Gowda *et al.*, 2016; Akbar *et al.*, 2018).

En addition à l'utilisation de ces cultivars portant plusieurs gènes qui codent pour des toxines différentes et présentent ainsi un spectre d'activité plus large (dans le but d'éliminer une majorité d'individus cibles dont ceux, hybrides, qui portent un allèle de résistance), Huang *et al.* (2011a et 2011b) ont préconisé la mise en place de cultures, dites « refuges », d'espèces végétales hôtes des ravageurs visés ou de surfaces non cultivées. Ces cultures et jachères sont destinées à servir de lieux de « production » d'individus sensibles aux toxines et censés prévenir le risque de résistance au champ des insectes ciblés par ces toxines en se croisant avec des individus potentiellement résistants. Cette stratégie, appelée « haute-dose

refuge» (HDR), a été promue en Australie par exemple, pour prévenir le risque de résistance au champ des insectes ciblés par ces toxines, avec des cultures de cotonniers non transformés, de *Cajanus cajan* et de maïs (Wilson *et al.*, 2013).

Cotonniers Bt : un avenir à construire avec précaution

Comparativement à ce qui est observé en Amérique, les situations sur le continent africain, où sont cultivées très peu de plantes GM à ce jour, nécessitent de prendre en compte l'intervention d'autres paramètres d'ordre agronomique, technologique ou économique, susceptibles d'avoir contrecarré le développement de cette technologie.

En Afrique du Sud, où des variétés de cotonniers portant le gène *cry1Ac* ont été cultivées à l'échelle commerciale dès 1998, les petits producteurs des plateaux des Makhathini Flats ont arrêté la production de ce type de cotonniers dix ans après, à la suite de banqueroutes des sociétés exploitantes (Dowd-Urbe et Schnurr, 2016).

Au Burkina Faso, des variétés portant les deux gènes *cry1Ac* et *cry2Ab* ont été libérées pour une exploitation commerciale de 2009 à 2016 (Vognan et Fok, 2019). En 2010, leur culture couvrait une superficie de près de 260 000 ha sur un total de 400 000 ha de cotonnier, soit 65 % des superficies de ce pays (James, 2011). Mais à la suite de la baisse de la longueur de la fibre présentée par ce type de variété, et non pas pour des raisons liées à l'efficacité des gènes codant pour la toxine, leur production n'a plus été acceptée par les sociétés cotonnières (Fok, 2016).

De ce qui précède, on peut conclure que le choix de «variétés transgéniques» peut, théoriquement, être privilégié dans le cas de plantations où les ravageurs majeurs sont des chenilles, carpophages ou phyllophages, sensibles aux toxines de *B. thuringiensis*, à condition toutefois qu'il se révèle économiquement intéressant dans la durée. De son côté, la mise en place de la stratégie HDR représente un coût, avec le suivi de l'évolution des résistances aux toxines chez les espèces de ravageurs visées. Enfin, le coût de la surveillance entomologique sera d'autant plus élevé si d'autres cultures transgéniques sont en place à côté de la sole cotonnière.

Tout récemment, la contribution de Santos-Amaya *et al.* (2024) à la compréhension de l'évolution de la résistance aux toxines de Bt présentes dans les cotonniers au Brésil souligne la nécessité de mener les nouvelles recherches sur les espèces envahissantes à une échelle mondiale. En tout état de cause, il apparaît, en définitive, «illusoire d'espérer définir une stratégie universellement adaptée», comme l'ont souligné Dalecky *et al.* (2007) dans leur étude sur la pyrale du maïs en France.

Difficultés de mise en œuvre des méthodes de lutte

La combinaison de méthodes de lutte très différentes par nature peut se révéler difficile. Par exemple, la lutte biologique par lâchers de trichogrammes parasitoïdes d'œufs de lépidoptères n'apparaît pas compatible avec la lutte chimique qui affectera ces hyménoptères. Il convient en fait de tirer parti des leçons apprises

ou d'explorer différentes méthodes reconnues ou signalées comme intéressantes (diversité végétale, approche paysagère), tout en mesurant les contraintes à leur adoption et leurs limites en matière d'efficacité.

Tirer parti des leçons issues de la culture du coton biologique

En production biologique de la culture cotonnière, où les insecticides chimiques de synthèse ne sont pas autorisés, la protection du cotonnier constitue un véritable défi compte tenu des nombreux ravageurs et maladies s'attaquant à cette plante. Les extraits de plantes à activité insecticide sont toutefois utilisables et des préparations de plantes locales sont employées. Force est de constater toutefois que, à l'exception des espèces souvent mentionnées (source de pyrèthre naturel, neem) ou plus récemment étudiées (Kobenan *et al.*, 2022a et 2022b), l'on connaît peu de choses sur le ou les composés actifs qu'elles contiennent. Les préparations sont employées de manière souvent empirique et leurs effets réels sur les ravageurs visés n'ont généralement pas fait l'objet d'une évaluation rigoureuse. De fait, les utilisateurs de ces mélanges rapportent souvent leur efficacité en mentionnant des effets répulsifs et non pas biocides, ce qui peut conduire les insectes ainsi repoussés à se développer sur les cultures voisines non traitées.

Il est clair que nos lacunes dans ce domaine justifient des investigations approfondies sur les extraits de plantes, à commencer par l'identification des molécules actives et par la détermination de leur efficacité à l'égard de différents insectes cibles. En parallèle pourrait être utilement recherchée sur le terrain l'efficacité d'un programme de traitement employant (1) des extraits en début de cycle de culture — à condition qu'ils n'exercent qu'une influence limitée sur les ennemis naturels présents — et (2) des insecticides organiques de synthèse par la suite, dans le cas où un ravageur important, comme *H. armigera* ou *A. grandis*, commence à intervenir et demeure impossible à maîtriser par d'autres procédés. Les premières expérimentations ont été entreprises dans ce sens par les chercheurs du réseau africain PR-PICA (données non publiées).

Étudier ou approfondir le rôle de la diversité végétale

Dans la gestion des ravageurs, prendre en compte la diversité végétale est considérée comme favorisant une meilleure régulation naturelle des populations de ravageurs. On peut agir sous différentes formes : couvertures végétales précédant le semis de cotonniers, détruites et laissées sèches sur le sol ou plantes conservées vivantes, associations culturales, plantes cultivées (ou plantes sauvages conservées) en bordure de champ, plantes répulsives des ravageurs (voir section « Associations de cultures et agroforesterie », chapitre 8).

Les couvertures végétales dans les systèmes de semis direct

Dans certains pays comme le Brésil (voir section « La diversité des modalités de culture du cotonnier », chapitre 1), le cotonnier est semé directement sous un couvert végétal volontairement cultivé qui est généralement détruit mécaniquement

ou chimiquement (herbicides) avant le semis ; le paillage (ou mulch) ainsi produit apporte une certaine protection contre l'envahissement par les mauvaises herbes et un maintien de l'humidité.

Au Pakistan, un paillage à base de chaume de riz ou d'autres plantes est connu sous la dénomination de *paedar quadratti nizam kashatqari* (PQNK) en langue urdu, soit *sustainable natural cultivation process* et *low expenditure environmental friendly* (LEEF) en anglais (Abdullah, 2022).

La culture associée du cotonnier avec le riz a été observée en 1985 au Laos (Guy Trébuil, communication personnelle), dans le cas de petits producteurs de riz (figure 109). Atique-ur-Rehman *et al.* (2020) la signalent également au Bangladesh. En fin de cycle du riz, les tiges desséchées constituent une forme de protection du sol.

Des espèces de plantes de couverture peuvent être conservées vivantes. C'est le cas avec l'espèce d'arachide *Arachis pintoi*, expérimentée au Brésil, qui est susceptible de favoriser l'action de certains champignons entomopathogènes, comme cela a été observé sur des insectes ne présentant pas forcément d'intérêt économique pour le cotonnier (figures 110 et 111). Il se pourrait donc qu'une couverture végétale ait pour conséquence un maintien et possiblement un renfort de l'action de régulation naturelle des ravageurs par des micro-organismes ou même par des arthropodes d'intérêt. Cela a été démontré aux États-Unis dans le cas des couverts végétaux avec *Secale cereale* (L.) et *Trifolium incarnatum* (L.) (Tillman *et al.*, 2004 ; Bowers *et al.*, 2020).

Il n'en reste pas moins que des couvertures végétales à base de graminées peuvent favoriser des ravageurs comme *Spodoptera frugiperda*, ou celles à base de Fabaceae comme *Cajanus cajan*, favoriser l'espèce *Helicoverpa armigera* (figure 112). Au Brésil, des pullulations de cette noctuelle ont ainsi été constatées certaines années sur des couvertures de millet (*Pennisetum glaucum*). D'une manière intéressante, ces pullulations ont été à l'origine d'augmentations spectaculaires des populations de carabes prédateurs (figure 113) et des cas de cannibalisme entre larves de carabes ont même été observés (figure 114). Malgré la survenue de telles situations, les producteurs sont quand même enclins à réaliser deux ou trois applications d'insecticides sur ces couvertures avant le semis des cotonniers, ce qui se traduit par la destruction des ravageurs (chenilles), ainsi que de leurs insectes prédateurs.

Ces constats nous ont incités à définir les avantages (quant aux ennemis naturels) et inconvénients (pour ce qui est des ravageurs) observés pour telle ou telle plante de couverture à l'occasion d'observations expérimentales réalisées au cours des années 2000 dans une fazenda de l'État du Mato Grosso au Brésil (tableau 10).

Les observations ayant porté sur quelques années, la variabilité des populations présentes d'une année à l'autre s'est traduite par une variabilité dans les phénomènes observés. Sur l'éleusine par exemple, le parasitisme des pucerons en fin de cycle n'a pas été constaté chaque année. Cela souligne la nécessité d'observer également les arthropodes présents sur les plantes de couverture et d'intégrer les informations correspondantes dans les prises de décision.



Figure 109. Culture du cotonnier en association avec du riz pluvial (desséché ici), au Laos (Savannakhet, 1985). Crédit photo : Guy Trébuil.



Figure 110. Chenille morte de mycose dans une couverture végétale à base de *Arachis pintoi* (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, janvier 2004)



Figure 111. Adulte de *Lagria villosa* mort d'une mycose, probablement due à une entomophthorale du genre *Batkoa* (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, janvier 2004)



Figure 112. Chenille d'Heliothinae sur gousse de *Cajanus cajan*, espèce de Fabaceae cultivée comme plante de couverture (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, décembre 2003)



Figure 113. Prédation au sol d'une chenille de *Spodoptera frugiperda* par des larves de coléoptères Carabidae (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, novembre 2005)



Figure 114. Cannibalisme entre larves de Carabidae (Brésil, Mato Grosso, fazenda Mourão, novembre 2005)

Tableau 10. Intérêts et inconvénients des couverts végétaux observés au Brésil (État du Mato Grosso) pour la gestion des insectes

| Type de couvert végétal | Intérêts | Inconvénients |
|---|---|---|
| <i>Eleusine coracana</i> | Héberge des pucerons parasités par <i>Lysiphlebus</i> | Présence de <i>S. frugiperda</i> et de punaises (<i>Creontiades purgatus</i>) |
| <i>Cajanus cajan</i> | L'entomofaune est, en général, différente de celle du cotonnier | Permet le développement de <i>Heliothis virescens</i> sur les gousses |
| <i>Arachis pintoi</i> | Présence de champignons entomopathogènes | Observation de chenilles du genre <i>Spodoptera</i> |
| <i>Cynodon dactylon</i> (tifon, Bermuda grass) | Entomofaune différente de celle du cotonnier (Cercopidae, Cicadellidae) | Management agronomique difficile (destruction du couvert) |
| <i>Brachiaria ruziziensis</i> | Biomasse substantielle | Permet le développement de <i>S. frugiperda</i> |
| <i>Pennisetum glaucum</i> | Parasitoïdes de chenilles observés sur les épis | Permet le développement de <i>S. frugiperda</i> |
| <i>Crotalaria spectabilis</i> , <i>C. juncea</i> | L'entomofaune est, en général, différente de celle du cotonnier | Fortement attaqué par <i>Megascelis</i> sp. (Chrysomelidae du soja); de plus, <i>Spodoptera cosmioides</i> s'en nourrit |
| <i>Sorghum</i> sp. | L'entomofaune est, en général, différente de celle du cotonnier | Permet le développement de <i>S. frugiperda</i> et de <i>Nezara viridula</i> en quelques années |

En conclusion, l'intérêt des pratiques de mise en place de couvertures végétales sur la diminution de la pression des ravageurs, sur le maintien ou sur l'augmentation de leurs ennemis naturels apparaît indiscutable. Des démonstrations rigoureuses sur des bases expérimentales devraient cependant être réalisées, comme cela a été entrepris au Cameroun (Brévault *et al.*, 2009).

La diversité végétale dans les alentours immédiats des champs cultivés

Prendre en considération les alentours des champs cultivés n'est pas nouveau. Ainsi, en 1953, Pierre Grison et Émile Biliotti rédigeaient déjà une note intitulée « La signification agricole des "stations-refuges" pour la faune entomologique » dans laquelle ils évoquaient le rôle des biotopes extérieurs aux cultures vis-à-vis de la régulation naturelle des ravageurs. Dans le cas de la culture cotonnière, elle s'applique surtout à des parcelles cultivées de petites dimensions (1 à 10 ha).

La prise en compte de l'environnement en dehors de la sole cultivée est rattachée à la stratégie de gestion (ou manipulation) de l'habitat ou encore à celle d'ingénierie écologique (*ecological engineering*), bien étudiées dans le cas du complexe des ravageurs du riz et de leurs ennemis naturels (Gurr *et al.*, 2011, 2012 et 2017). Dans le cas de la culture cotonnière au Brésil, une synthèse des pratiques relevant de la gestion de l'habitat a été publiée (Silvie *et al.*, 2006). Elle fait état notamment du faible nombre d'études entomologiques sur certaines pratiques pourtant largement répandues dans ce pays, comme le semis direct sous couvert

végétal. Dans la région du Nordeste, les associations culturales sont aujourd'hui une réalité dans le cadre de la relance de la production cotonnière biologique certifiée, parfois avec des variétés à fibre de couleur marron ou rousse (De Almeida *et al.*, 2019). La coriandre est employée comme plante répulsive des ravageurs, comme en Inde où elle est recommandée en culture biologique (FiBL, 2022).

L'intérêt de la gestion de l'habitat pour la maîtrise des ravageurs, qui consiste en la conservation ou le renforcement de la présence des insectes bénéfiques ou le détournement des ravageurs vers d'autres plantes que le cotonnier, est sans doute plus facile à étudier et à démontrer dans les régions humides. Dans des régions sèches où la verdure est globalement moins présente et maintenue principalement par les plantes en bordure de fleuve ou les bas-fonds, son intérêt reste à démontrer. La stratégie qualifiée de *push-pull* en anglais suppose d'attirer en bordure de champ un ravageur vers une plante autre que la culture à protéger et de le repousser grâce à une autre plante, présente, elle, au sein de la culture. Cette stratégie a été tentée dès 1987 dans le cas de la culture cotonnière en Australie (Pyke *et al.*, 1987). En Inde, elle a été expérimentée contre *H. armigera* en association avec l'application de virus de la polyédrose nucléaire de l'insecte et de l'extrait de neem (Duraimurugan et Regupathy, 2005). Soulignons cependant qu'attirer les ravageurs du cotonnier en dehors des champs cultivés est un défi nécessitant une bonne connaissance de leurs plantes-hôtes, notamment dans le cas des insectes polyphages.

Dans de nombreuses situations, un dilemme est posé. Ainsi est-il toujours intéressant de maintenir une certaine diversité végétale, comme le suggèrent Altieri et Letourneau (1982) et Altieri (1999), quitte à maintenir des ravageurs comme les punaises, par exemple ?

Les facteurs climatiques interviennent également sur les plantes et les insectes qu'elles hébergent avec, notamment, dans le cas du cotonnier, la durée de la saison sèche en Afrique et les températures associées. La culture de plantes-refuges (haies en bordure, arbres ou arbustes plantés) pour les ennemis naturels qui sont liés par exemple aux colonies de pucerons serait une expérimentation à mener, afin de vérifier que cette stratégie est viable, biologiquement et économiquement.

L'approche de la gestion des ravageurs du cotonnier par la « manipulation » de l'agrosystème, notamment pour multiplier les ennemis naturels des ravageurs, est fondamentalement écologiquement séduisante. Elle ne peut que susciter des travaux entomologiques prometteurs sur la biologie des ennemis naturels en dehors des cultures, travaux indispensables afin d'en démontrer tout l'intérêt.

Approche paysagère et défis à relever

Prendre en compte pour la gestion des populations de ravageurs non seulement le champ cultivé, mais aussi les cultures adjacentes ou associées et plus largement le milieu environnant relève d'une approche qualifiée de « paysagère ». D'une certaine manière, une forme simplifiée de gestion paysagère est représentée

par la stratégie dite « d'éradication » de l'anthonome, adoptée aux États-Unis. Dans ce cas, en effet, la seule culture du cotonnier est observée avec la définition d'une zone de suivi par pièges à phéromone géoréférencés. Des interventions chimiques par traitements aériens sont programmées dès que la présence de l'insecte est constatée dans les pièges.

La stratégie de gestion des ravageurs à l'échelle de la mosaïque paysagère, qui comprend plusieurs espèces végétales, cultivées ou non, avec des éléments structurés (rives de cours d'eau, haies, qualifiées aujourd'hui d'infrastructures agroécologiques) est à relier à la stratégie d'*area-wide integrated pest management* mentionnée dans la section « Lutte biologique et biocontrôle » (chapitre 5), même si cette dernière est généralement employée pour une seule espèce de nuisible.

En culture cotonnière, des recherches conduites selon cette approche ont été notamment réalisées aux États-Unis (Prasifka *et al.*, 2004a; Carrière *et al.*, 2012) et en Australie (Schellhorn *et al.*, 2014 et 2015). Prasifka *et al.* (2004a) et Schellhorn *et al.* (2014 et 2015) ont ainsi souligné l'intérêt d'observer également les ennemis naturels dans le contexte paysager, cependant que Carrière *et al.* (2012) accordaient une attention particulière à la punaise *Lygus hesperus*. Quelques travaux ont été également conduits en Chine (Liu *et al.*, 2016) et sur le continent africain (Tsafack *et al.*, 2013 et 2015); ils ont porté sur *H. armigera*, les travaux chinois s'intéressant principalement au parasitisme des œufs par les trichogrammes.

Les travaux dans ce domaine consistent le plus souvent à cartographier les éléments du paysage autour de champs cultivés, à définir des variables paysagères (métriques du paysage par exemple [Parajulee *et al.*, 2011]), puis à rechercher des corrélations avec des variables représentant, elles, les populations de ravageurs ou de dégâts.

Si la réalisation concrète des observations, qui exige un travail pluri et interdisciplinaire, constitue une difficulté en soi, d'autres contraintes interviennent :

- la variabilité interannuelle des infestations des ravageurs, qui peut être liée — ou non — à la réduction de l'aire cultivée du cotonnier sur un temps long (dizaines d'années) et au développement d'espèces végétales favorables aux ravageurs (Goodell, 2009);
- la possibilité d'expérimenter en modifiant la composition paysagère, donc la localisation géographique des champs cultivés;
- la non-maîtrise d'espèces cultivées en intersaison (tomates, gombos), par exemple dans des bas-fonds rizicoles en Afrique subsaharienne (Tsafack *et al.*, 2013 et 2015).

Notons enfin que, dans les études portant sur les paysages et sur leurs éléments constitutifs, la composition floristique des habitats non cultivés n'est généralement pas détaillée.

Chapitre 10

Conclusions et perspectives

Le changement global (changement climatique, commerce international mondialisé, crise énergétique et raréfaction des ressources énergétiques fossiles) ainsi que l'évolution des sociétés auront de multiples répercussions qu'il est difficile d'anticiper dans leur ensemble. Les impacts de la pandémie de COVID-19 ont par exemple été analysés. D'autres perturbations interviennent présentement, comme l'augmentation des coûts des produits et des services à base de pétrole (engrais, insecticides, mécanisation de la culture). Comme toute autre culture, la culture cotonnière aura, dans les années à venir, à relever des défis complexes. Les perspectives en la matière sont ici discutées en distinguant trois domaines : les ravageurs du cotonnier, leurs interactions avec les différentes méthodes de protection et les acteurs de la chaîne de valeur.

Diversité taxinomique, biologie et écologie des ravageurs

La diversité des ravageurs du cotonnier et celle des contextes et des modes de production de cette plante dans le monde sont liées. Au Brésil, avec un objectif de rendements parmi les plus élevés au monde en culture pluviale, le volume de biomasse à produire est propice au développement de nombreux ravageurs et maladies. À l'inverse, les rendements moyens de coton-graine dans les pays francophones d'Afrique, autour de la tonne par hectare, entraînent *de facto* une moindre quantité de ravageurs, mais avec des effets tout aussi importants aux plans quantitatif et qualitatif, pouvant atteindre la totalité de la production.

À la diversité spécifique des déprédateurs s'ajoutent, potentiellement, la diversité infraspécifique et celle liée aux espèces exotiques envahissantes, comme le montrent les exemples récents observés sur les continents américain et africain. La diversité infraspécifique se manifeste avec les biotypes de *B. tabaci* et la question de l'existence de biotypes/souches/races peut même aujourd'hui être posée dans le cas de l'espèce *Spodoptera frugiperda*, où l'hybridation entre les deux biotypes (R pour *rice* et C pour *corn*; Nagoshi *et al.* 2007a) est observée (Tay *et al.*, 2023).

Concernant les espèces exotiques envahissantes, les tableaux suivants présentent les espèces principales de ravageurs du cotonnier en Afrique en regard de celles du même groupe taxinomique en Amérique (tableau 11) ou en Asie (tableau 12), mais non signalées sur le continent africain et susceptibles d'y poser à l'avenir de nouveaux problèmes. Lus en sens inverse, ces tableaux indiquent les ravageurs exotiques potentiellement dangereux pour les continents américain et asiatique.

Ils ne précisent toutefois pas les espèces de groupes taxinomiques importants numériquement, comme les espèces de thysanoptères, les piqueurs-suceurs (cochenilles, punaises des familles Pentatomidae et Miridae) ou les coléoptères Chrysomelidae. Clairement, dans une tentative globale d'analyse de risques, un inventaire mondial avec emploi des techniques modernes d'identification serait fort utile.

Tableau 11. Comparaison des espèces d'insectes présents sur le cotonnier en Amérique latine et en Afrique, selon les groupes taxinomiques (les espèces déjà présentes sur les deux continents sont exclues)

| | Amérique latine (Paraguay, Brésil) | Afrique subsaharienne (sauf mention) |
|---------------------|---|--|
| Lépidoptères | <i>Alabama argillacea</i> | <i>Haritalodes derogata</i> |
| | <i>Chrysodeixis</i> (= <i>Pseudoplusia</i>) <i>inclusens</i> | <i>Anomis flava</i> |
| | <i>Spodoptera eridania</i> * | <i>Spodoptera littoralis</i> |
| | <i>Chloridea</i> (= <i>Heliothis</i>) <i>virescens</i> | <i>Diparopsis watersi</i> |
| | <i>Spodoptera cosmioides</i> | <i>Thaumatotibia leucotreta</i> |
| | <i>Agrotis ipsilon</i> | <i>Mussidia nigrivenella</i> |
| | | <i>Diparopsis castanea</i> (Afrique australe) |
| Coléoptères | <i>Eutinobothrus brasiliensis</i> | <i>Sphenoptera gossypii</i> |
| | <i>Conotrachelus denieri</i> | <i>Syagrus calcaratus</i> |
| | <i>Anthonomus grandis</i> | |
| Hétéroptères | <i>Dysdercus chaquensis</i> | <i>Dysdercus voelkeri</i> |
| | <i>Dysdercus peruvianus</i> | |
| Homoptères | <i>Agallia albidula</i> | <i>Jacobiella facialis</i> |
| | | <i>Austroasca</i> (= <i>Jacobiasca</i>) <i>lybica</i> |
| | | <i>Orosius cellulosus</i> |
| | | <i>Amrasca biguttula biguttula</i> |
| | | <i>Paurocephala gossypii</i> (psylle) |
| Acariens | <i>Tetranychus ludeni</i> | |

* Espèce signalée récemment en Afrique (Goergen, 2018 ; Weinberg *et al.*, 2022)

Tableau 12. Comparaison des espèces d'insectes présents sur le cotonnier en Afrique et en Asie, selon les groupes taxinomiques (les espèces déjà présentes sur les deux continents sont exclues)

| | Afrique subsaharienne (sauf mention) | Asie (Chine, Inde) |
|---------------------|---|---------------------------|
| Lépidoptères | <i>Spodoptera littoralis</i> | <i>Spodoptera litura</i> |
| | <i>Diparopsis watersi</i> | <i>Earias vitella</i> |
| | <i>Thaumatotibia leucotreta</i> | |
| | <i>Earias biplaga</i> | |
| Coléoptères | <i>Sphenoptera gossypii</i> | |

| | Afrique subsaharienne (sauf mention) | Asie (Chine, Inde) |
|---------------------|---|--------------------------------------|
| Hétéroptères | <i>Dysdercus voelkeri</i> | <i>Creontiades biseratens</i> (Inde) |
| | <i>Helopeltis schoutedeni</i> | <i>Capylomma livida</i> (Inde) |
| | | <i>Hyalopepsus lineifer</i> (Inde) |
| Homoptères | <i>Jacobiella facialis</i> | <i>Phenacoccus solenopsis</i> |
| | <i>Austroasca (= Jacobiasca) lybica</i> | <i>Maconellicoccus hirsutus</i> |
| | <i>Orosius celulosus</i> | |
| | <i>Paurocephala gossypii</i> (psylle) | |
| Acariens | <i>Tetranychus urticae</i> | |

Aux espèces mentionnées dans ces tableaux pourraient s'ajouter des espèces particulières répertoriées dans certains pays, telles que :

– au Pérou : les lépidoptères Pyralidae *Mescinia peruella* Schaus et *Pococera atramentalis* Lederer, ou le coléoptère Curculionidae *Anthonomus vestitus* Boheman, qui s'attaquent aux organes fructifères (Herrera Aratniguena, 1961; Gonzalez Bachini, 1982);

– au Brésil : le lépidoptère Pyralidae *Elasmopalpus lignosellus*, qui a fait l'objet d'une analyse de l'European Food Safety Authority (EFSA, 2021);

– en Inde : la mouche *Dasineura gossypii*, déjà mentionnée, ainsi que le lépidoptère Noctuidae *Perigea capensis* (Guénée) (Kranthi *et al.*, 2011).

D'autres espèces, plus rarement rencontrées, sont citées dans les synthèses de Waghmare *et al.* (2021), en Inde, Zhaoshi *et al.* (2021), en Chine, Matthews (2021) au Soudan, Matthews et Tunstall (2021), en Afrique du Sud, et Matthews et Grundy (2021) en Australie. Ajoutons que les thrips, dont plusieurs espèces peuvent poser des problèmes en début de cycle (Cook *et al.*, 2011), pourraient être à l'origine de dégâts plus importants dans les années à venir.

Si besoin était, l'établissement d'espèces exotiques recensées en dehors de leur aire de répartition d'origine, telles que *Helicoverpa armigera* au Brésil ou *Spodoptera frugiperda* dans le reste du monde, montre à quel point une vérification correcte et régulière de l'identité des espèces rencontrées sur le cotonnier est nécessaire.

Il est en effet essentiel de détecter aussi précocement que possible (dès que des symptômes ou des dégâts inhabituels sont signalés) la présence d'espèces introduites. À ce titre, les échanges de connaissances et d'informations entre chercheurs de tous pays, comme la formation des cultivateurs, mais également des conseillers techniques, sont primordiaux.

L'identification précise permet un accès au domaine bibliographique concerné. Ce dernier couvre en partie les connaissances sur la biologie des ravageurs et leur écologie. En partie seulement, car des lacunes demeurent encore à combler dans les études des interactions entre insectes et leurs ennemis naturels. La prédation intragilde, par exemple, a été mentionnée dans le cas des lâchers de la coccinelle *Delphastus catalinae* (Horn) prédatrice de l'aleurode *Bemisia argentifolii* Bellows et Perry, sur le cotonnier, en Californie (Heinz *et al.*, 1999). Œufs, larves et nymphes

de la coccinelle libérée sont en effet consommés par des insectes prédateurs généralistes tels que des punaises (des genres *Orius*, *Geocoris*, *Zelus*, *Sinea*, *Nabis*), des chrysope et même d'autres coccinelles du genre *Hippodamia*.

En dehors de l'accès à la bibliographie, l'adhésion aux réseaux scientifiques existants (PestNetwork) est une manière efficace de bénéficier des connaissances acquises au niveau mondial. Ces accès doivent être facilités aux scientifiques dans les pays faiblement dotés d'infrastructures numériques.

Parmi les connaissances manquantes dans le cas des espèces d'arthropodes exotiques envahissantes figurent celles liées à leurs déplacements au sein d'un paysage ou à plus large échelle. Ce manque de connaissances peut être pallié par l'utilisation des modèles existants employés dans l'analyse des risques. La part de succès d'une invasion, puis d'une nouvelle répartition géographique d'une espèce, voire d'un biotype, doit être faite entre la présence de conditions locales favorables *a priori* et les effets potentiels du dérèglement climatique sur les insectes ravageurs. Concernant ces derniers effets, il n'est pas certain que toutes les recherches nationales disposent de données d'observation suffisantes. Or pour mettre en évidence l'importance de l'augmentation des températures et des précipitations sur la troisième génération d'adultes de *H. armigera*, Huang et Hao (2020) ont réalisé en Chine, de 1991 à 2015, des comptages quotidiens des captures faites par pièges lumineux, étant entendu que les données climatiques correspondantes étaient également disponibles.

Développer de nouvelles connaissances sur les interactions ravageurs-cotonnier

La plus grande partie des méthodes présentées dans cet ouvrage correspondent à une protection du cotonnier proprement dite ou à des pratiques agissant sur des processus de régulation naturelle ou sur le comportement des insectes. La protection inclut les actions préventives, comme le choix de la variété et le traitement de semences, et les pulvérisations, curatives, sur les parties aériennes de la plante, ces traitements réalisés parfois de façon préventive (cas de *Eutinobothrus brasiliensis*, voir section « Difficultés de définition ou d'application des seuils », chapitre 9).

Une approche intégrée actualisée de la protection du cotonnier — que l'on pourrait appeler également agroécologique ou, comme le proposent Gliessman *et al.* (2022), en anglais, d'*ecological pest management* (EPM) ou encore d'*environmental pest management* (Coll et Wajnberg, 2017) — nécessitera de prendre en compte tous les nouveaux moyens d'étude qui sont aujourd'hui disponibles, de la plante elle-même jusqu'à l'environnement paysager, en passant par chacun de ses ravageurs et des ennemis naturels respectifs de ces derniers. Bien plus, les mécanismes sous-jacents des interactions plante-sol-insecte constituent d'autres éléments qui mériteraient d'être davantage étudiés. Les différentes échelles d'analyse envisagées sont détaillées ci-dessous, le cadre d'analyse ESR (voir section « De l'agriculture conventionnelle à une agriculture durable », chapitre 5) pouvant en outre être utilement rappelé ici, étant donné que certaines pratiques se réfèrent

à l'amélioration de leur efficacité (E), tandis que d'autres relèvent davantage de la substitution (S) des produits de synthèse.

Méthodes de défense par la plante elle-même

Comme nous l'avons vu dans le cas des plantes génétiquement modifiées (cotonniers Bt, voir section « Cas de la culture cotonnière dite conventionnelle », chapitre 6), les techniques avancées de biologie moléculaire ont permis d'accéder à une manipulation entraînant une défense au niveau de la plante elle-même, cela par le biais de la production d'une toxine de bactérie qui affecte certains insectes. Les recherches dans ce domaine de la biotechnologie se poursuivent grâce à la mise au point de plusieurs autres techniques³³ utilisant des mécanismes variés et étant annoncées comme prometteuses.

Ces techniques visent à perturber ou à empêcher l'expression de gènes importants pour la physiologie de l'insecte (appelés *housekeeping genes*, en anglais). Le mécanisme varie selon la technique.

Dans le cas de la technique de RNAi, décrite par Price et Gatehouse (2008), Yu *et al.* (2013), Kim *et al.* (2015), Zotti et Smaghe (2015), Zhu et Palli (2020) et Kim et Zhang (2023), une interférence des ARN messagers des gènes d'intérêt (pour l'insecte) est recherchée en provoquant leur rupture par l'expression de petites séquences d'ARN, *small interference RNA* (siARN), microARN (miARN), ou par des ARN double brin (dsARN) (Tarazi *et al.*, 2020). La protéine qui code pour le gène visé n'est ainsi plus produite. Cette technique correspond aux termes français « d'extinction » ou de « silençage » de gène.

L'apport des séquences d'ARN (siARN ou dsARN) peut se faire, de manière expérimentale, par injection dans l'insecte au stade œuf ou au 4^e stade larvaire (chenille chez les lépidoptères), par ingestion du milieu liquide (insectes piqueurs-suceurs) ou solide, comme un milieu artificiel d'élevage ou des feuilles sur lesquelles a été déposée la solution contenant les ARN. Une autre voie possible est l'ingestion de bactéries (*Escherichia coli*) exprimant des dsARN (Tian *et al.*, 2009; Zhang H. *et al.*, 2013). La voie apparaissant la plus aisée à appliquer à grande échelle est l'apport direct, via la plante qui sera alors génétiquement transformée (Mao *et al.*, 2007 et 2011).

Celle technique a été étudiée dans le cas de certaines espèces d'insectes présentes sur le cotonnier, lépidoptères, coléoptère ou insectes piqueurs-suceurs, en visant des gènes particuliers :

– le gène *CYP6AE14* du groupe des cytochromes P450, chez *Helicoverpa armigera*, permettant de contourner les effets toxiques du gossypol, en Chine³⁴ (Mao *et al.*, 2007 et 2011), les gènes *CYP6B6* (Zhang X. *et al.*, 2013) et *coatomer β* et

³³ Elles ont pour sigles, en anglais, ZFN (*zinc-finger nucleases*), TALEN (*transcription activator-like effector nucleases*), CRISPR-Cas9 (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats/clustered associated nuclease 9*), RNAi (*RNA interference*, ou ARN interférent en français).

³⁴ Inventaire non exhaustif, d'autres gènes ont été ciblés pour cette espèce, en Chine.

v-ATPase A (Mao *et al.*, 2015) toujours en Chine, le gène de l'acétylcholinestérase (Kumar *et al.*, 2009), de la chymotrypsine ou l'enzyme liée à la production d'hormone juvénile en Inde (Asokan *et al.*, 2013);

– le gène *A* de l'enzyme (chitine synthase) permettant la synthèse de la chitine chez *Spodoptera exigua* (Chen *et al.*, 2008; Tian *et al.*, 2009);

– les gènes de l'allatostatine type AS-C ou de l'allatotropine AT qui interviennent dans la synthèse de l'hormone juvénile chez *S. frugiperda* (Meyering-Vos *et al.*, 2006; Griebler *et al.*, 2008);

– le gène de la chitine synthase chez *Anthonomus grandis* au Brésil (Gillet *et al.*, 2017; Macedo *et al.*, 2017).

Chez les insectes piqueurs-suceurs rencontrés sur le cotonnier, les premiers travaux dans ce domaine ont porté sur l'identification des gènes d'intérêt à viser. De nature davantage fondamentale, ils ont impliqué la mise au point de techniques d'ingestion de milieu liquide à travers des membranes :

– divers gènes dont celui de l'aquaporine dans le cas de *Amrasca biguttula biguttula* et *Bemisia tabaci* en Inde (Singh *et al.*, 2018 et 2022; Gupta *et al.*, 2021);

– le gène de l'aquaporine et le gène *SNF7* chez *Thrips tabaci* en Inde (Singh *et al.*, 2022);

– les gènes de l'aquaporine, de la calcitonine et le gène *hot shock protein 20* chez *Bemisia tabaci* en Inde (Wamiq et Khan, 2018);

– les gènes *Bursicon* et *V-ATPase* chez *Phenacoccus solenopsis* en Inde (Singh *et al.*, 2022) et sur tabac au Pakistan (Khan *et al.*, 2018);

– le gène *AsFAR* (pour *fatty acyl-coa reductase*) chez la punaise Miridae *Adelphocoris suturalis* (Jakovlev), une des deux espèces ayant provoqué des pertes après l'adoption du coton Bt en Chine (Luo *et al.*, 2017).

Il est cependant reconnu que la technique du RNAi (pour ARN interférent) fonctionne de manière plus efficace dans le cas des coléoptères que dans le cas des autres ordres d'insectes (Scott *et al.*, 2013; Zhang H. *et al.*, 2013; Terenius *et al.*, 2011; Shukla *et al.*, 2016; Zhu et Palli, 2020; Nitnavare *et al.*, 2021). Un mécanisme expliquant ce manque d'efficacité a été proposé dans le cas du lépidoptère *Spodoptera frugiperda*, à savoir l'accumulation des dsARN dans des endosomes (Yoon *et al.*, 2017). La dégradation par des enzymes (nucléases) présentes dans le tube digestif des insectes a été vérifiée (Gillet *et al.*, 2017).

Comparativement, la technique CRISPR-Cas9 s'est ainsi révélée plus intéressante. Elle apparaît en effet plus simple pour les spécialistes dans ce domaine, car elle nécessite seulement la nucléase Cas9 couplée à une molécule *single guide RNA* (sgRNA) pour couper une séquence spécifique du gène et ainsi empêcher la production de la protéine. Elle a été utilisée dans le cas de lépidoptères ravageurs, notamment à des fins de recherches à caractère plus fondamental sur le fonctionnement de certains gènes marqueurs. L'objectif est de provoquer des mutations destinées à empêcher leur fonctionnement. Le terme français « d'édition » de gène est employé, ainsi que les expressions anglaises *knockdown* et *knockout* pour signifier l'arrêt de fonctionnement du gène visé.

Parmi les lépidoptères étudiés, on peut citer des espèces de Noctuidae, comme *Mythimna separata* (Walker) sur le riz en Chine (Tang *et al.*, 2022), *Spodoptera litura* (Bi *et al.*, 2016) et *S. frugiperda* (Wu *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2020) et, dans la famille des Plutellidae, l'espèce *Plutella xylostella* (L.), ravageur bien connu sur les choux (Huang *et al.*, 2016).

Les limitations constatées dans ces travaux ont orienté les recherches récentes vers la production de plants présentant à la fois les caractéristiques de plants Bt et de plants « RNAi » avec la technique dite « d'empilage de gènes » ou *pyramiding*, en anglais (Ni *et al.*, 2017). Dans ce cas, ce sont les protéines liées à la synthèse et au transport de l'hormone juvénile de *H. armigera* qui sont visées.

Toutes les techniques évoquées ci-dessus sont sophistiquées. Elles sont susceptibles d'apporter des solutions dans le futur si elles se révèlent réellement efficaces, économiquement rentables, mais également approuvées par les sociétés civiles, dont certaines organisations sont très critiques vis-à-vis de toutes les biotechnologies (Sirinathsinghji *et al.*, 2020). De plus, leur coût technologique fera probablement que leur utilisation sera réservée aux seuls producteurs de type agro-industriel.

Aussi, dans un tel contexte et dans celui de perturbation climatique mondiale avec, en Afrique subsaharienne notamment, des périodes de sécheresse non maîtrisables, il est clair que pour les petits producteurs africains le développement plus classique de variétés à cycle déterminé pourrait être une option à privilégier (Tuong-Vi *et al.*, 2011).

Interactions plante-ravageurs-ennemis naturels

Les relations entre les composantes du modèle biologique constitué de la plante, de ses ravageurs et de leurs ennemis naturels font intervenir des composés chimiques, volatils ou non, dont les échanges relèvent des domaines d'étude des écologies chimique et comportementale.

En dehors des phéromones, des pratiques de gestion des ravageurs liées à l'écologie chimique ont déjà été mises au point. Ainsi, l'utilisation d'une formulation³⁵ sucrée imitant les substances florales qui attirent mâles et femelles d'*Heliothinae* est préconisée en Australie (Mensah *et al.*, 2013). Une application est effectuée dans un rang sur deux avec de petits enjambeurs fixés latéralement à une motocyclette (Gregg *et al.*, 2010). À cette formulation est ajoutée une molécule chimique qui tue l'adulte qui s'en alimente, ce qui représente un exemple de la stratégie dite « attirer et éliminer » (*attract and kill*) (Del Socorro *et al.*, 2010).

La pratique de l'écimage fait également intervenir des composés organiques volatils (Llandres *et al.*, 2018). Elle consiste à pincer et à couper manuellement par torsion la partie apicale de la tige principale, dix jours après l'apparition de la première fleur. Les expérimentations menées chez des producteurs au Mali et portant sur le couplage de l'emploi des seuils avec la technique d'écimage des

³⁵ MAGNET, formulé par AgBiTech Australia.

cotonniers ont montré son intérêt (Renou *et al.*, 2011 et 2012). Une pratique voisine (étêtage ou *detopping*) est utilisée en Chine (Dai *et al.*, 2014 ; Dai et Dong, 2015) pour une meilleure production, et au Bangladesh pour raccourcir la durée de présence au champ sans affecter le rendement (Janangir *et al.*, 2022). Elle est également employée au Brésil dans une optique de maîtrise de certains ravageurs (Dos Santos Neves *et al.*, 2010). En fait, la pratique de l'écimage pour la maîtrise des chenilles de *Earias* spp. était préconisée dès 1926 par Vayssière et Mimeur qui ont notamment cité cette précision de Ghesquière, conseillant d'étêter les cotonniers « juste au-dessus de la dernière capsule dont on attend raisonnablement la maturité ». Plus récemment, dans leur étude sur les interactions entre plants de cotonniers, ravageurs et ennemis naturels, Llandres *et al.* (2018) ont décrit et développé l'approche appelée *plant training for induced defense* associant les opérations de *topping*, ou *tipping* ou *detopping* (écimage, étêtage) à celles de retrait des bourgeons terminaux des branches végétatives et fructifères (*pruning*, en anglais), voire des branches végétatives complètes, comme cela est pratiqué en Chine.

La propagation d'un micro-organisme entomopathogène par des insectes de l'espèce ciblée par ce dernier (autodissémination, assistée³⁶ ou non) ou d'une autre espèce (*entomovectoring*) pourrait être développée dans le cas où une seule espèce de ravageur est présente (Baverstock *et al.*, 2010). Cette possibilité a été étudiée au Royaume-Uni, avec des expériences de libération, sur des plantes infestées de pucerons sensibles à un champignon entomopathogène, de coccinelles ayant reçu une douche de conidies de ce micro-organisme (Pell *et al.*, 1997).

Effet des composantes biologiques du sol

On a peu exploré à ce jour les relations complexes, « ternaires », pouvant exister entre les divers compartiments du système sol-plante-ravageur : les micro-organismes du sol, la plante et ses bioagresseurs, les apports de matières organiques. Or ces relations interviennent en cas de gestion des ravageurs par l'utilisation, même réduite, d'insecticides chimiques de synthèse et de gestion de la fertilité des sols.

Dans ce domaine, la revue proposée par Pineda *et al.* (2010) constitue une bonne entrée en matière, avec un schéma des interactions potentielles entre les parties souterraines et les parties aériennes des plantes en lien avec les bioagresseurs de type insecte et leurs ennemis naturels.

Pour la partie souterraine de la plante, une analyse des interactions entre la partie vivante des sols (microbiome, mycorhizes) et les effets éventuels sur l'attractivité des ravageurs ou de leurs ennemis naturels serait à développer. À cet égard, des travaux récents ont été consacrés aux effets du sol sur le développement des ravageurs comme les lépidoptères Noctuidae du genre *Spodoptera* : *S. exigua* (Van Oosten *et al.*, 2008 ; Nangle, 2012 ; Zebelo *et al.*, 2016), *S. frugiperda* (Coy, 2014 ;

³⁶ L'insecte visé est alors attiré dans un dispositif de piégeage, où il est contaminé par le micro-organisme entomopathogène.

Coy *et al.*, 2017), *S. littoralis* (Kempel *et al.*, 2009), *S. litura* (Sripontan *et al.*, 2014). Coy *et al.* (2017) ont pu montrer en outre que les apports au sol sur des plants de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. ont été capables de modifier la ponte des femelles de *S. frugiperda*.

De même, il serait intéressant d'étudier en détail les effets de l'application foliaire directe de micro-organismes sur les insectes. Dans le cas du cotonnier, des applications foliaires de rhizobactéries PGPR (espèce *Bacillus subtilis*, *plant growth promoting rhizobacteria*), associées ou non à de la chitine, ont été réalisées directement sur des capsules vertes de cotonniers en pots sous serre ; elles se sont révélées avoir un effet anti-appétant sur les troisièmes stades larvaires de *H. armigera* (Vijayasamundeeswari *et al.*, 2009).

Une autre voie d'étude concerne les effets des micro-organismes endophytiques, champignons ou bactéries qui se développent à l'intérieur des plantes. Azevedo *et al.* (2000) mentionnent ainsi des exemples d'espèces de ces champignons affectant les chenilles de *Spodoptera eridania* et *S. frugiperda*. Plus récemment, Saad *et al.* (2019) ont étudié les effets de divers champignons endophytiques sur les chenilles de *Spodoptera littoralis*, avec une méthodologie externe à la plante. Les modes d'action évoqués dans le cas d'effets *in vivo* passent par la production probable de toxines par le champignon présent dans la plante.

Agents de biocontrôle, produits et formulations à promouvoir

De nouveaux produits, agents de biocontrôle ou formulations apparaissent nécessaires pour pallier les problèmes et les difficultés rencontrés à ce jour. Leur mise au point doit absolument tenir compte des connaissances et de l'expérience précédemment acquises.

Ainsi, nous avons déjà mentionné la substitution des insecticides chimiques de synthèse par des substances naturelles ou des agents de biocontrôle, extraits faits de manière extemporanée ou formulations, dans le cas de la culture de coton biologique. Les chercheurs australiens ont travaillé sur l'usage d'huiles à base de pétrole (Mensah *et al.*, 1995 ; Najar-Rodríguez *et al.*, 2008 ; Williamson et Mensah, 2016) et d'un extrait botanique à base de *Clitoria terneata* (L.) (Fabaceae) qui a été commercialisé³⁷ (Mensah *et al.*, 2013, 2014 et 2015). Au Brésil, des recherches préliminaires ont porté sur l'épandage du kaolin (figure 115), substance argileuse destinée à protéger le cotonnier contre les attaques de l'anthonome (Silva et Ramalho, 2013 ; Neves *et al.*, 2014). Le kaolin a montré cependant un intérêt limité vis-à-vis des stades immatures des thysanoptères *Frankliniella fusca* (Hinds) sur le cotonnier, aux États-Unis (Knight *et al.*, 2017).

En permettant théoriquement une libération progressive dans le milieu de substances actives (extraits végétaux) ou de composés volatils comme les huiles essentielles, l'encapsulation dans des nanoparticules est une autre voie d'étude

³⁷ SERO X®, commercialisé en 2015.



Figure 115. Application de kaolin (roche argileuse) sur les cotonniers, parcelle à droite de l'image (Brésil, Pernambuco, Surubim, août 2017). Crédit photo : Jorge Bras Torres.

possible de nouvelles formulations. Des essais préliminaires ont ainsi été réalisés en laboratoire, conduisant à des résultats intéressants avec l'usage de nanoparticules d'argent enrobant des extraits de *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) vis-à-vis de *H. armigera* (Soni et Dhiman, 2022) ou de *Saponaria officinalis* (Caryophyllaceae) vis-à-vis de l'acarien *Tetranychus urticae* (Pavela *et al.*, 2017).

Par ailleurs, l'encapsulation pourrait être employée dans le cas des phéromones perturbant le rapprochement des sexes (confusion sexuelle, en anglais *mating disruption*), ce qui a pour effet de limiter la reproduction (Lykouressis *et al.*, 2005).

La technique de l'insecte stérile (TIS, ou SIT en anglais), une des modalités de lutte dite « autocide » (Ris *et al.*, 2022), est parfois classée parmi les autres moyens de biocontrôle, bien qu'elle ne concerne pas les plantes, mais des modifications qui intéressent les insectes eux-mêmes. La stérilisation massive de mâles provenant d'élevages qui, relâchés dans la nature, sont censés concurrencer les mâles fertiles en s'accouplant aux femelles qui n'auront pas de descendance a été promue en Californie contre *P. gossypiella*, en complément de la culture de cotonniers Bt (Simmons *et al.*, 2011; Tabashnik *et al.*, 2021).

Modalités d'application

Dans toutes les situations d'épandage de produits phytosanitaires évoquées dans cet ouvrage, il s'agit de déposer les substances actives là où elles sont les plus efficaces. Le matériel d'application joue *de facto* un rôle important, étant entendu qu'il est variable selon la taille des exploitations.

Les drones constituent aujourd'hui un nouvel outil potentiel en cours d'étude (Huang *et al.*, 2013 ; Xiongkui *et al.*, 2017). Des inconvénients subsistent, comme la durée des interventions limitée par l'autonomie des batteries, mais cette technique a l'avantage de moins exposer l'applicateur aux effets des produits toxiques. À ce jour, des épandages de trichogrammes, parasitoïdes d'œufs de lépidoptères, sont proposés par plusieurs sociétés dans le cas d'autres cultures que le cotonnier comme le maïs³⁸.

Implication des acteurs de la chaîne de valeur

Les différentes communautés d'acteurs œuvrant dans la chaîne de valeur de la filière coton devront affronter au moins trois défis dans l'avenir :

- un défi écologique : la réduction de l'usage des produits phytosanitaires de synthèse et des intrants issus de la pétrochimie, en lien avec la demande sociétale, le maintien de la biodiversité pour favoriser la régulation naturelle des ravageurs et le risque d'invasion de bioagresseurs ;
- un défi climatique : le déplacement éventuel des zones de production couplé avec la révision, voire l'actualisation des calendriers culturels notamment en Afrique subsaharienne, en lien avec la pluviométrie et les épisodes de sécheresse ;
- un défi économique, lié aux deux autres et aux coûts croissants des intrants importés.

D'autres contraintes, elles, imprévisibles, sont susceptibles de survenir et d'agir sur la filière, comme cela a été enregistré avec la crise liée à la pandémie de COVID-19 (ICAC, 2020).

Du champ au consommateur, les communautés d'acteurs impliquées dans la filière sont nombreuses. Elles comprennent les producteurs et les productrices — ces dernières ayant souvent la charge, en Afrique, de la production de coton biologique —, les différentes organisations de producteurs, dont les coopératives, les firmes qui fournissent les intrants — dont les produits de synthèse —, les agents de la vulgarisation et de l'encadrement, les conseillers agricoles, les chercheurs, les industriels de la transformation, les acteurs de la commercialisation, de la réglementation et de la communication, les acteurs de la société civile (organisations non gouvernementales participant à la formation et aux démonstrations) et les consommateurs, qui peuvent opter pour des achats de produits finaux textiles bénéficiant ou non de labels (coton bio, commerce équitable).

Chacune de ces communautés joue un rôle dans la structuration de la filière et peut exercer une influence, plus ou moins forte, sur les modalités de production et de protection des cotonniers. Pour ce qui concerne la gestion des ravageurs, qui est le cœur de cet ouvrage, seules sont abordées ici les questions essentiellement liées aux communautés des producteurs et au domaine de la recherche. Nous les considérons de manière séparée, tout en ayant en tête l'importance des interactions entre ces deux communautés, qui a été soulignée dans le dialogue publié entre K. Andrew, entomologiste, et J. Bentley, anthropologue (Bentley et Andrews, 1991).

³⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=1diDyrDUUsQ>.

Les communautés de producteurs

Parmi les nombreuses modalités et pratiques de protection du cotonnier présentées, certaines n'ont pas été massivement adoptées par les producteurs, certaines ont été adaptées, tandis que d'autres ont été abandonnées avec le temps, le plus souvent sans intégration des stratégies à la base de ces méthodes (Morse et Buhler, 1997a et 1997b; Prudent *et al.*, 2006; Brewer et Goodell, 2012; Deguine *et al.*, 2021) et ce, quel que soit le niveau de production ou de système de culture. Rappelons de plus que dans le cas des espèces de ravageurs autochtones connus depuis longtemps, l'application de programmes de traitement employant des seuils d'intervention a tout de même été abandonnée dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne.

Diverses raisons peuvent expliquer la faible adoption ou la non-adoption de pratiques malgré la promotion qui peut en être faite : l'illettrisme et le manque de formation ou de supports adaptés au transfert de messages techniques plus ou moins complexes (Wyckhuys *et al.*, 2019), l'incompréhension locale de stratégies ou de concepts considérés comme académiques, l'usage prédominant des langues locales, ainsi en Afrique (Tourneux, 2006), des pratiques trop contraignantes (manque de main-d'œuvre par exemple), le manque de transfert des connaissances entre les générations de producteurs.

S'y ajoute une autre raison, qui est le manque de prise en compte, par la recherche, des besoins réels et des contraintes des producteurs ou des productrices de coton en matière de ressources matérielles ou humaines. Cela peut expliquer la difficulté de mise à grande échelle d'une option qui paraît *a priori* séduisante au niveau de dispositifs de recherche.

Cette remarque s'applique également aux entreprises agricoles qui cultivent le cotonnier sur des superficies immenses, avec des investissements financiers en matériels très importants. Si des manuels très détaillés sont consacrés aux pratiques élaborées par la recherche en Australie ou aux États-Unis, il n'est pas aisé de disposer de statistiques agricoles mentionnant le niveau d'adoption réel — ou même les adaptations qui ont été apportées — de telles pratiques, les superficies concernées, etc.

Dans le cas de l'agriculture familiale, menée sur des superficies moindres, l'inclusion dans la filière globale des producteurs, de leurs organisations et, plus largement, des collectivités territoriales fait l'objet aujourd'hui de nombreux projets basés sur une approche participative au sein de « laboratoires vivants » (*living labs*). Ces plates-formes intègrent les différents acteurs, y compris les autorités politiques des niveaux locaux, régionaux, voire nationaux. En outre, elles prennent en compte des aspects économiques, des aspects socioculturels, incluant la question du genre, qui est de plus en plus étudiée (Christie *et al.*, 2015; Wang et Fok, 2016; Aboudou et Fok, 2019) et celle des autres catégories sociales défavorisées (jeunes, personnes âgées). Une telle approche devrait déboucher sur une réelle coconception de systèmes de culture adaptés à toutes les contraintes locales.

Le potentiel de développement des pratiques qualifiées aujourd'hui d'agroécologiques et dont nous avons décrit la diversité est élevé d'autant que 84 % des fermes au niveau mondial ont une superficie de moins de deux hectares (Lowder *et al.*, 2016). Leurs propriétaires ont donc, théoriquement, fort intérêt à les adopter dans une optique de réduction des frais liés aux intrants chimiques de synthèse et de contamination des applicateurs, des consommateurs et de l'environnement.

Dans le cas des espèces de ravageurs envahissantes, un système de surveillance adéquat est nécessaire pour rapporter, du champ vers les spécialistes, toute attaque inhabituelle. Pour ce faire, l'appel aux sciences participatives est une méthode qui est expérimentée dans les pays industrialisés. Dans les pays à faibles revenus, les signalements faits par les petits producteurs sont essentiels. Les outils modernes de communication (photographies envoyées par téléphone) sont indispensables et à privilégier, ainsi que les supports visuels pour les formations, à adapter si besoin aux personnes illettrées. Une application destinée aux producteurs et aux services d'encadrement a ainsi été mise à disposition³⁹.

Le domaine de la recherche

Comme le montre cet ouvrage, les inventions et les innovations en matière de gestion des ravageurs mises au point par la recherche en entomologie cotonnière sont très nombreuses et diversifiées. Les méthodes de protection proposées sont le plus souvent à la fois soucieuses d'optimiser l'usage des insecticides de synthèse autant que possible en le réduisant, et centrées sur la gestion d'une seule espèce de ravageur ou un groupe d'espèces de même niche écologique (pucerons, acariens, chenilles des organes fructifères). Elles tiennent rarement compte de l'ensemble du complexe des bioagresseurs ou du système de culture dans la globalité, ce que dénoncent Wyckhuys *et al.* (2023) dans une analyse à caractère général.

Il s'agit donc aujourd'hui pour la recherche d'intégrer réellement non seulement toutes les données disponibles en matière de protection intégrée *sensu lato*, mais également tout un ensemble de connaissances dépassant le cadre strict de la culture de coton dans l'espace restreint du seul champ — ou du regroupement de champs — cultivé sur une surface donnée. Une telle approche devra tenir compte également de l'aménagement de l'habitat, des aspects sociologiques (Brévault et Clouvel, 2019) ainsi que des perturbations climatiques, même *a priori* non prévisibles, et de leurs effets sur la répartition des insectes ravageurs actuels.

Ce faisant, et en s'appuyant à la fois sur les expériences acquises, sur les travaux publiés et sur les connaissances, souvent empiriques, des cultivateurs eux-mêmes, la recherche serait véritablement en mesure de développer des méthodes de gestion des populations de ravageurs, pertinentes et adaptées localement. De ce point de vue, la validation de l'usage des formulations traditionnelles à base d'extraits botaniques représenterait un bon exemple d'une telle approche globale.

³⁹ <https://apps.apple.com/us/app/icac-cotton-expert/id1489311998>.

Références bibliographiques

- Abate T., van Huis A., Ampofo J.K.O., 2000. Pest management strategies in traditional agriculture: an African perspective, *Annual Review of Entomology*, 45, 631-659.
- Abd-Alla A.M., El-Sheikh A.K., Abol-Ela S., Fédière G., Giannotti J., El-Sharaby A.M.F., 1997. Laboratory bioassay and host range tests of the granulosis virus of *Spodoptera littoralis*, *Bull. Ent. Soc. Egypt. Econ. Ser.*, 24(22), 22-32.
- Abdullah K., 2022. Advances in cotton Integrated Pest Management, *The ICAC Recorder*, International Cotton Advisory Committee, December 2022, XL, (4), 16-19.
- Abol-Ela S., Fédière G., Nour-el-Din A., Kamiss O., Salah M., 1994. Restriction endonucleases and diagnosis of the granulosis virus isolated from *S. littoralis* (Boisd.) in West Africa and multiplied in Egypt, *Bull. Fac. Agric. Cairo Univ.*, 45, 919-932.
- Aboudou F., Fok M., 2019. Women's empowerment in cotton growing: a case in Northern Benin, *AgriGender*, 4(1), 13-29.
- Achaleke J., Martin T., Ghogomou R.T., Vaissayre M., Brévault T., 2009a. Esterase-mediated resistance to pyrethroids in field populations of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) from Central Africa, *Pest Manag. Sci.*, 65 (10), 1147-1154. <https://doi.org/10.1002/ps.1807>.
- Achaleke J., Vaissayre M., Brévault T., 2009b. Evaluating pyrethroid alternatives for the management of cotton bollworms and resistance in Cameroon, *Experimental Agriculture*, 45(1), 35-46. <https://doi.org/10.1017/S0014479708007060>.
- Achaleke J., Brévault T., 2010. Inheritance and stability of pyrethroid resistance in the cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Central Africa, *Pest Manag. Sci.*, 66, 137-141. <https://doi.org/10.1002/ps.1843>.
- Adechian S.A., Baco M.N., Akponikpe I., Imorou Toko I., Egah J., Affoukou K., 2015. Les pratiques paysannes de gestion des pesticides sur le maïs et le coton dans le bassin cotonnier du Bénin, *Vertigo*, 15, 1-15.
- Agbohessi T.P., Imorou Toko I., Kestemont P., 2012. État des lieux de la contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides organochlorés dans le Bassin cotonnier béninois, *Cahiers Agricultures*, 21, 46-56.
- AGCD (Administration générale de la coopération au développement), 1992. Le cotonnier au Zaïre, sous la direction de J. Demol, *Publication agricole*, 29, 247 p.
- Agrofoglio Y.C., Delfosse V.C., Casse M.F., Hopp H.E., Kresic I.B., Distéfano A.J., 2017. Identification of a new cotton disease caused by an atypical cotton leaf roll dwarf virus in Argentina, *Phytopathology*, 107(3), 369-376.
- Akbar W., Gowda A., Ahrens J.E., Stelzer J.W., Brown R.S., Bollman S.L. *et al.*, 2018. First transgenic trait control of plant bugs and thrips in cotton, *Pest Management Science*, 75, 867-877.
- Allen C.T., 2008. Boll weevil eradication: an areawide pest management effort, in Koul O., Cuperus G., Elliott N. (eds), CABI, *Areawide pest management. Theory and implementation*, chapitre 20, 467-559.
- Altieri M.A., Letourneau D., 1982. Vegetation management and biological control in agroecosystems, *Crop Protection*, 1(4), 405-430.
- Altieri M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems, *Agriculture, Ecosystems, Environment*, 74, 19-31.

- Amera T., Mensah R.K., Belay A., 2017. Integrated pest management in a cotton-growing area in the Southern Rift Valley region of Ethiopia: development and application of a supplementary food spray product to manage pests and beneficial insects, *International Journal of Pest Management*, 63(2), 185-204.
- Arnold M.D., Dever J.K., Parajulee M.N., Carroll S.C., Flippin H.D., 2012. Simple and effective method for evaluating cotton seedlings for resistance to Thrips in a greenhouse, and a Thrips species composition on the Texas High Plains, *Southwestern Entomologist*, 37(3), 305-313.
- Asokan R., Chandra G.S., Manamohan M., Kumar N.K.K., 2013. Effect of diet delivered various concentrations of double-stranded RNA in silencing a midgut and a non-midgut gene of *Helicoverpa armigera*, *Bulletin of Entomological Research*, 103, 555-563.
- Aspirot J., Menozzi P., 1985. Étude expérimentale en culture cotonnière de nouveaux programmes de protection phytosanitaire mis en place au Tchad sur la station de Bébedjia, *Coton et fibres tropicales*, 40, 29-34.
- Atique-ur-Rehman, Ali H., Sarwar N., Ahmad S., Farooq O., Nahar K. *et al.*, 2020. Cotton-based intercropping systems, in Ahmad S., Hasanuzzaman M. (eds), *Cotton Production and Uses*, Singapore, Springer, 321-340. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2_17.
- Aubertot J.-N., Boiffin J., Lescourret F., 2016. L'agronomie est-elle soluble dans l'agroécologie? In Deguine J.-P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.-N. (coord.), *Protection agro-écologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 30-38.
- Azambuja R., Degrande P.E., 2013. Trinta anos do bicudo-do-algodoeiro no Brasil, *Arquivos do Instituto Biológico*, 81, 377-410.
- Azevedo J.L., Maccheroni Jr. W., Pereira J.O., de Araújo W. L., 2000. Endophytic micro-organisms: a review on insect control and recent advances on tropical plants, *Electronic Journal of Biotechnology*, 3(1), 40-65.
- Bachelier B., Gourlot J.-P., 2021. Culture cotonnière – Produits, marchés et enjeux de durabilité, *Techniques de l'ingénieur, bioprocédés*, N4600v1, 1-16.
- Barbosa S., Lukefahr M.J., Braga Sobrinho R. (eds), 1986. O bicudo do algodoeiro, Embrapa, Departamento de difusão de tecnologia, Brasília-DF, Brasil, 314 p.
- Bashir Y.G.A., El Amin E.M., El Amin E.M., 2003. Development and implementation of integrated pest management in the Sudan, Chapter 12, In Marédia K.M., Dakouo D., Mota-Sanchez D. (eds), *Integrated pest management in the global arena*, CABI Publishing, 131-141.
- Bastos C.S., Pereira M.J.B., Takizawa E., Ohl G., de Aquino V.R., 2005. Bicudo do algodoeiro: identificação, biologia, amostragem e táticas de controle, *Circular técnica*, 79, Embrapa, 31 p.
- Baum K.J.A., Sukuru U.R., Penn S. R., Meyer S.E., Subbarao S., Shi X. *et al.*, 2012. Cotton plants expressing a Hemipteran-active *Bacillus thuringiensis* crystal protein impact the development and survival of *Lygus hesperus* (Hemiptera: Miridae) nymphs, *J. Econ. Entomol.*, 105(2), 616-624.
- Baverstock J., Roy H.E., Pell J.K., 2010. Entomopathogenic fungi and insect behaviour: from unsuspecting hosts to targeted vectors, *BioControl*, 55, 89-102.
- Bealmear S.R., Bundy C.S., 2006. *Lygus hesperus* feeding injury to Bt cotton in New Mexico, *Proceedings of the Beltwide Cotton Conferences*, 1100-1104.
- Beeden P., 1972. The pegboard – An aid to cotton pest scouting, *PANS*, 18, 43-45.
- Bélot J.-L., Carraro I.M., De Andrade Vilela P.M.C., Pupim Junior O., Martin J., Silvie P. *et al.*, 2005a. De nouvelles variétés de cotonnier obtenues au Brésil : 15 ans de collaboration entre la Coopérative centrale de recherche agricole (Coodetec) et le Cirad, *Cahiers Agricultures*, 14(2), 249-254.
- Bélot J.-L., Carraro I.M., De Andrade Vilela P.M.C., Pupim Junior O., Martin J., Silvie P. *et al.*, 2005b. Novas variedades de algodão obtidas no Brasil: 15 anos de colaboração entre a Coodetec e o Cirad, *Cadernos de ciência, tecnologia*, 22(2), 479-494.

- Bélot J.-L. (ed.), Vilela P. (ed.), Silvie P., Michel B., Gondin D.M.C., Petit N. *et al.*, 2019. Compêndio de identificação: Problemas agrônômicos em algodoeiro e ferramentas de controle. Cuiabá, IMAmt, 304 p.
- Bélot J.-L., Vilela P. (eds.), 2020. Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso, Ampa, IMAmt, 463 p.
- Bentley J.W., Andrews K.L., 1991. Pest, peasants, and publications: anthropological and entomological views of an integrated pest management program for small-scale Honduran farmers, *Human Organization*, 50(2), 113-124.
- Bérenger J.-M., Pluot-Sigwalt D., 1997. Relations privilégiées de certains Heteroptera Reduviidae prédateurs avec les végétaux. Premier cas connu d'un Harpactorinae phytophage, *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie*, 320, 1007-1012.
- Bernard J.-L., 2017. *Biocontrôle en protection des cultures. Périmètre, succès, freins, espoirs*, éditions l'Harmattan, 206 p.
- Bi H.-L., Xu J., Tan A.-J., Huang Y.-P., 2016. CRISPR/Cas9-mediated targeted gene mutagenesis in *Spodoptera litura*, *Insect Science*, 23, 469-477.
- Bottrell D.G., Adkisson P.L., 1977. Cotton insect pest management, *Annual Review of Entomology*, 22, 451-481.
- Bottrell D.G., Schoenly K.G., 2018. Integrated pest management for resource-limited farmers: challenges for achieving ecological, social and economic sustainability, *The Journal of Agricultural Science*, 156, 408-426.
- Bousslama T., Chaieb I., Rhouma A., Laarif A., 2020. Evaluation of a *Bacillus thuringiensis* isolate-based formulation against the pod borer, *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae), *Journal of Biological Pest Control*, 30, 16. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00218-z>.
- Bowers C., Toews M., Liu Y., Schmidt J.M., 2020. Cover crops improve early season natural enemy recruitment and pest management in cotton production, *Biological Control*, 141, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104149>.
- Brader L., 1967. La faune des cotonniers sans glande dans la partie méridionale du Tchad. I. Les altises, *Coton et fibres tropicales*, 22(2), 171-181.
- Brenière J., 1965. Liste des parasites et prédateurs des principaux insectes nuisibles aux cultures à Madagascar, *L'Agronomie tropicale*, 20(3), 344-349.
- Brévault T., Achaleke J., 2005. Status of pyrethroid resistance in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, in Cameroun, *Resist. Pest Manag.*, 15(1), 4-7.
- Brévault T., Achaleke J., Sougnabé S.P., Vaissayre M., 2008a. Tracking pyrethroid resistance in the polyphagous bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae), in the shifting landscape of a cotton-growing area, *Bull. Ent. Res.*, 98(6), 565-573. <https://doi.org/10.1017/S0007485308005877>.
- Brévault T., Guibert H., Naudin K., 2008b. Preliminary studies of pest constraints to cotton seedlings in a direct seeding mulch-based system in Cameroon, *Expl. Agric.*, 45, 25-33.
- Brévault T., Couston L., Bertrand A., Thézé M., Nibouche S., Vaissayre M., 2009. Sequential pegboard to support small farmers in cotton pest control decision-making in Cameroon, *Crop Protection*, 28, 968-973.
- Brévault T., Clouvel P., 2019. Pest management: Reconciling farming practices and natural regulations, *Crop Protection*, 115, 1-6.
- Brévault T., Badiane D., Goebel R., Renou A., Téréta I., Clouvel P., 2019. Repenser la gestion des ravageurs du cotonnier en Afrique de l'Ouest, *Cahiers Agricultures*, 28, 25.
- Brewer M.J., Goodell P.B., 2012. Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues, *Annual Review of Entomology*, 57, 41-59.
- Brixhe A., 1949. *Les parasites du cotonnier en Afrique centrale. Tableaux de détermination*. 2^e édition, 184 p.

- Brixhe A., 1961. *Les parasites du cotonnier en Afrique centrale. Tableaux de détermination*. 3^e édition, 217 p.
- Bugg R.L., Pickett C.H., 1998. Introduction, in *Enhancing biological control. Habitat management to promote natural enemies of agricultural pests*, Pickett C.H., Bugg R.L. (eds.), 1-23.
- Cadou J., 1982. Niveau de protection phytosanitaire et rendement en culture cotonnière pluviale au Mali, *Coton et fibres tropicales*, 37, 317-325.
- Cai Y., Xie Y., Liu J., 2010. Glandless seed and glanded plant research in cotton. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 181-190.
- Camargo L.M.P.C.A., Batista Filho A., Cruz B.P.B., 1984. Ocorrência do fungo *Beauveria* sp. patogênico ao “bicudo” do algodoeiro (*Anthonomus grandis* Boheman) na região de Campinas, Estado de S. Paulo, *O Biológico*, 50, 65-68.
- Campion D.G., Critchley B.R., McVeigh L.J., 1989. Mating disruption, in *Insect pheromones in plant protection*, Jutsum A.R., Gordon R.F.S. (Eds.), John Wiley, Sons Ltd publ., 89-119.
- Carpenter J., Boem S., Hofmeyr H., 2007. Area-wide control tactics for the false codling moth *Thaumatotibia leucotreta* in South Africa: a potential invasive species, in *Area-wide control of insects pests: from research to field implementation*, Vreysen M.J.B., Robinson A.S., Hendrichs J. (eds), 351-359.
- Carrière Y., Goodell P.B., Ellers-Kirk C., Larocque G., Dutilleul P., Naranjo S.E. et al., 2012. Effects of local and landscape factors on population dynamics of a cotton pest, *PLoS ONE*, 7(6), e39862. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039862>.
- Carson R., 1962. *Silent Spring*, Boston, Massachusetts, Houghton Mifflin, 386 p.
- Castañé C., Arnó J., Gabarra R., Alomar O., 2011. Plant damage to vegetable crops by zoophytophagous mirid predators, *Biological Control*, 59, 22-29.
- Cauquil J., 1974. Essai de deux insecticides-acaricides systémiques contre la « maladie bleue » (virose) du cotonnier (*G. hirsutum* L.) en Centrafrique, *Coton et fibres tropicales*, 29(3), 327-329.
- Cauquil J., 1977. Études sur une maladie d'origine virale du cotonnier, la maladie bleue, *Coton et fibres tropicales*, 32(3), 259-278.
- Cauquil J., 1993. Maladies et ravageurs du cotonnier en Afrique au sud du Sahara, Cirad-CA ed., 92 p.
- Cauquil J., Vaissayre M., 1971. La « maladie bleue » du cotonnier en Afrique : transmission de cotonnier à cotonnier par *Aphis gossypii* Glover, *Coton et fibres tropicales*, 26(4), 463-466.
- Cauquil J., Follin J.C., 1983. Les maladies du cotonnier attribuées à des virus ou à des mycoplasmes en Afrique au sud du Sahara et dans le reste du monde, *Coton et fibres tropicales*, 38(4), 293-317.
- Cauquil J., Jouve G., Guillaumont M., 1978. Premiers résultats obtenus en Empire centrafricain sur la lutte chimique contre *Aphis gossypii* Glover, vecteur d'une « virose » du cotonnier : la maladie bleue, *Coton et fibres tropicales*, 33, 335-351.
- Cauquil J., Vincens P., Denéchère M., Mianzé T., 1982. Nouvelle contribution sur la lutte chimique contre *Aphis gossypii* Glover, ravageur du cotonnier en Centrafrique, *Coton et fibres tropicales*, 37(4), 333-350.
- Chakraborty P., Prabhu S.T., Balikai R.A., Udikeri S.S., 2015. Biology of cotton flower bud maggot, *Dasineura gossypii* Fletcher – An emerging pest on Bt cotton in Karnataka, *J. Exp. Zool. India*, 18(1), 143-146.
- Chamuene A., Ecole C., Sidumo A., 2007a. Effect of strip intercropping for management of the American bollworm, *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton (*Gossypium hirsutum*) in Morrumbala district, *African Crop Science Conference Proceedings*, 8, 1049-1052.
- Chamuene A., Ecole C., Freire M., Macuácuá R., Maposse I., Santos L. et al., 2007b. Cropping systems and pest management strategies in the Morrumbala region of Mozambique: enhancing smallholders cash crop production and productivity, *African Crop Science Conference Proceedings*, 8, 1045-1047.

- Chen X., Tian H., Zou L., Tang B., Hu J., Zhang W., 2008. Disruption of *Spodoptera exigua* larval development by silencing chitin synthase gene A with RNA interference, *Bulletin of Entomological Research*, 98, 613-619.
- Chi B., Zhang Y., Zhang D., Zhang X., Dai J., Dong H., 2019. Wide-strip intercropping of cotton and peanut combined with strip rotation increases crop productivity and economic returns, *Field Crops Research*, 243, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107617>.
- Chi B.-J., Zhang D.-M., Dong H.-Z., 2021. Control of cotton pests and diseases by intercropping: a review, *Journal of Integrative Agriculture*, 20(12), 3089-3100.
- Christie M.E., Van Houweling E., Zselezky L., 2015. Mapping gendered pest management knowledge, practices, and pesticide exposure pathways in Ghana and Mali, *Agric. Hum. Values*, 32, 761-775.
- Coll M., Wajnberg E. (Eds.), 2017. *Environmental Pest Management. Challenges for agronomists, ecologists, economists and policymakers*, Hoboken, USA, John Wiley, Sons Ltd., 431 p.
- Conway H.E., Steinkraus D.C., Kring T.J., 2001. Inclusion of beneficial insects into the cotton aphid treatment threshold, *AAES Research Series*, 497, 182-188.
- Cook D., Herbert A., Akin D.S., Reed J., 2011. Biology, crop injury, and management of Thrips (Thysanoptera: Thripidae) infesting cotton seedlings in the United States, *Journal of Integrated Pest Management*, 2(2), 1-9.
- Corbett A., Leigh T.F., Wilson L.T., 1991. Interplanting alfalfa as a source of *Metaseiulus occidentalis* (Acari: Phytoseiidae) for managing spider mites in cotton, *Biological Control*, 1, 188-196.
- Corrêa R.L., Silva T.F., Simões-Araújo J.L., Barroso P.A.V., Vidal M.S., Vaslin M.F.S., 2005. Molecular characterization of a virus from the family *Luteoviridae* associated with cotton blue disease, *Archives of Virology*, 150, 1357-1367. <https://doi.org/10.1007/s00705-004-0475-8>.
- Costa A.S., Forster R., 1938. Nota preliminar sobre uma nova moléstia de vírus do algodoeiro: mosaico das nervuras, *Rev. Agric.*, 13, 187-191.
- Costa A.S., Carvalho A.M.B., 1962. Moléstia de vírus do algodoeiro, *Bragantia*, 21, 50-62.
- Côte F.X., Rapidel B., Sourisseau J.M., Affholder F., Andrieu N., Bessou C. et al., 2022. Levers for the agroecological transition of tropical agriculture, *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 67. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00799-z>.
- Couilloud R., 1989. Hétéroptères déprédateurs du cotonnier en Afrique et à Madagascar (Pyrrhocoridae, Pentatomidae, Coreidae, Alydidae, Rhopalidae, Lygaeidae), *Coton et fibres tropicales*, 44(3), 185-227.
- Coy R.M., 2014. Potential of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) as a biological control agent against warm-season turfgrass pests, MS Thesis, Auburn University, Auburn AL., 94 p.
- Coy R.M., Held D.W., Kloepper J.W., 2017. Bacterial inoculant treatment of bermudagrass alters ovipositional behavior, larval and pupal weights of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae), *Environmental Entomology*, 46(4), 831-838.
- CRDC (Cotton Research and Development Corporation), 2022. Cotton pest management guide 2022-23, CRDC, Australia, CottonInfo (eds.), 150 p.
- Crétenet M., Gourlot J.-P. (coord.), 2016. *Le Cotonnier*, Versailles, éditions Quæ, 216 p.
- Crétenet R., De Raucourt B., Gramain E., Bailly R., 1970. Seize années d'expérimentation sisalière à la station du Mandrare (Madagascar) 1953-1968, *Coton et fibres tropicales*, 25, 151-174.
- Critchley B.R., 1991. Commercial use of pink bollworm pheromone formulations in Egyptian cotton pest management, *Pest Outlook*, 2, 9-13.
- Cunningham G.L., Grefenstette W.J., 2000. Eradication of the cotton boll weevil (*Anthonomus grandis*) in the United States: a successful multi-regional approach, in Keng-Hong Tan (ed.), *Area-wide control of fruit flies and other insect pests*, Imperial Valley, California, 153-158.

- Czepak C., Albernaz K.C., Vivan L.M., Guimarães H.O., Carvalhais T., 2013. First reported occurrence of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil, *Pesq. Agropec. Trop.*, 43, 110-113.
- Dai J., Dong H., 2014. Intensive cotton farming technologies in China: achievements, challenges and countermeasures, *Field Crops Research*, 155, 99-110.
- Dai J., Dong H., 2015. Les technologies de la culture intensive du coton en Chine, *The ICAC Recorder*, 33(2), 17-28.
- Dai J., Luo Z., Li W., Tang W., Zhang D., Lu H. *et al.*, 2014. A simplified pruning method for profitable cotton production in the Yellow River valley of China, *Field Crops Research*, 164, 22-29.
- Dalecky A., Bourguet D., Ponsard S., 2007. La pyrale se disperse-t-elle suffisamment pour limiter durablement la résistance au maïs Bt *via* la stratégie « haute-dose/refuge »?, *Cahiers Agricultures*, 16(3), 171-176.
- Dalin P., Demoly T., Kabir M.F., Björkman C., 2011. Global land-use change and the importance of zoophytophagous bugs in biological control: Coppicing willows as a timely example, *Biological Control*, 59, 6-12.
- Da Silva T.F., Corrêa R.L., de Abreu E.O., Castilho Y., Suassuna N., Silvie P. *et al.*, 2007. Avaliação da diversidade genética do vírus responsável pela doença azul do algodoeiro, Cotton leafroll dwarf virus (CLRDV), entre isolados provenientes de Mato Grosso, Goiás e São Paulo, *in O algodão como oportunidade de negócios: VI Congresso Brasileiro do Algodão, 13 a 16 de Agosto de 2007, Uberlândia, Brasil*.
- Da Silva T.F., Corrêa R.L., Castilho Y., Silvie P., Bélot J.L., Vaslin de Freitas Silva M., 2008. Widespread distribution and a new recombinant species of Brazilian virus associated with cotton blue disease, *Virology journal*, 5(123). <https://doi.org/10.1186/1743-422X-5-123>.
- De Almeida R.P., Soares J.J., de Albuquerque F.A., 2019. Manejo agroecológico de pragas do algodoeiro, Embrapa, *Circular técnica*, 141, 47 p.
- De Barro P.J., Liu S.S., Boykin L.M., Dinsdale A., 2011. *Bemisia tabaci*: a statement of species status, *Annual Review of Entomology*, 56, 1-19.
- De Bon H., Huat J., Parrot L., Sinzogan A., Martin T., Malézieux E. *et al.*, 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.
- De B. Lyon D.J., 1994. Integrated pest management in cotton, *in Proceedings of the World Cotton Research Conference-1, Brisbane, Australia, February 14-17, G.A. Constable, N.W. Forrester (eds.), CSIRO, Melbourne, 456-465*.
- Debru J., 2008. Le coton biologique au Paraguay. État des lieux de la filière coton biologique au Paraguay au 20 mai 2008, rapport de stage, Cirad, AgroParisTech, 48 p.
- Deguine J.-P., Silvie P., 1988. Un nouveau programme de protection insecticide en culture cotonnière au Tchad : augmentation des cadences de traitements et réduction des doses, *Medelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit Gent*, 53(2B), 771-787.
- Deguine J.-P., Ekukole G., 1994. Nouveau programme de protection en culture cotonnière au Cameroun, *Agriculture, Développement*, 1, 59-63.
- Deguine J.-P., Ferron P., 2008. *Protection des cultures : de l'agrochimie à l'agroécologie*, Versailles, éditions Quæ, 188 p.
- Deguine J.-P., Ledouble H., 2022. Le biocontrôle en France : de quoi parle-t-on?, *Cahiers Agri-cultures*, 31(19), 8 p.
- Deguine J.-P., Ekukole G., Amiot E., 1993. La lutte étagée ciblée : un nouveau programme de protection insecticide en culture cotonnière au Cameroun, *Coton et fibres tropicales*, 48(2), 99-119.
- Deguine J.-P., Ferron P., Russell D., 2008. Sustainable pest management for cotton production. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 113-117.

- Deguine J.-P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.-N. (coord.), 2016. *Protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 288 p.
- Deguine J.-P., Atiama-Nurbel T., Ajaguin Soleyen C., Bialecki A., Beaudemoulin H., Carrière J. *et al.*, 2020. Production durable d'extraits naturels biocides de deux Pipéracées à La Réunion, *Innovations Agronomiques*, 79, 101-120.
- Deguine J.-P., Aubertot J.-N., For R.J., Lescourret F., Wuckhuys K.A.G., Ratnadass A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 41(38). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>.
- Deguine J.-P., Aubertot J.-N., Bellon S., Côte F., Lauri P.E., Lescourret F. *et al.*, 2023. Agro-ecological crop protection for sustainable agriculture. Chapter 1, *Advances in Agronomy*, 178, 1-59. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.002>.
- Delattre R., 1958. Les parasites du cotonnier à Madagascar, *Coton et fibres tropicales*, 13(3), 335-352.
- Delattre R., 1965. La virescence du cotonnier. I. Recherches préliminaires, *Coton et fibres tropicales*, 20(2), 289-294.
- Delattre R., 1968. La virescence du cotonnier. Deuxième note, *Coton et fibres tropicales*, 23(3), 386-390.
- Del Socorro A.P., Gregg P.C., Hawes A.J., 2010. Development of a synthetic plant volatile-based attracticide for female noctuid moths. III. Insecticides for adult *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), *Australian Journal of Entomology*, 49, 31-39.
- Demange J.-M., 1957. Myriapodes Diplopodes du Tchad (A.E.F.) nuisibles au cotonnier, *Bulletin du Museum*, 2^e série, 24(1), 96-105.
- Desai H.R., Patel R.D., Bhandari G.R., Patel M.C., 2022. Insight into innovations in entomology and their applications in pest management in Gujarat cotton, *Cotton Innovation*, 1(1), 10-16.
- De Sousa H.F.A., 2007. Effect of strip intercropping of cotton and maize on pest incidence and yield in Morrumbala District, Mozambique, *African Crop Science Conference Proceedings*, 8, 1053-1055.
- Devi S., Ram P., Rolania K., 2020. Effect of intercropping on the parasitoids, *Encarsia* spp. and *Trichogramma* spp. in cotton fields, India, *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(71). <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00275-4>.
- Dhawan A.K., Peshin R., 2009. Integrated Pest Management: concept, opportunities and challenges, in *Integrated pest management: Innovation-development process*, Peshin R., Dhawan A.K. (eds.), Springer Netherlands, 51-81.
- Dhurua S., Gujar G.T., 2011. Field-evolved resistance to Bt toxin Cry1Ac in the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), from India, *Pest Management Science*, 67, 898-903.
- Diarra M., Havard M., Soumaré M., 2020. La perception des avantages et des contraintes de l'écimage du cotonnier par les producteurs du Mali, *Cahiers Agricultures*, 29(10). <https://doi.org/10.1051/cagri/2020007>.
- Distéfano A.J., Kresci I.B., Hopp H.E., 2010. The complete genome sequence of a virus associated with cotton blue disease, cotton leaf dwarf virus, confirms that it is a new member of the genus *Polerovirus*, *Archives of Virology*, 155, 1849-1854.
- Djagni K.K., Fok M., 2019. Dangers potentiels de l'utilisation des insecticides dans la culture cotonnière au Togo de 1990 à 2010, *Cahiers Agricultures*, 28, 1-9. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019023>.
- Donald C.E., Scott R.P., Blaustein K.L., Halbleib M.L., Sarr M., Jepson P.C. *et al.*, 2016. Silicone wristbands detect individuals' pesticide exposures in West Africa, *R. Soc. Open Sci.*, 3, 160433.
- Doré T., Bellon S., 2019. *Les Mondes de l'agroécologie*, Versailles, éditions Quæ, 173 p.
- Dos Santos Neves R.C., Torres J.B., da Silva M.N.B., 2010. Época apropriada para a poda apical do algodoeiro para o controle de pragas, *Pesq. Agropec. Bras.*, 45(12), 1342-1350.

- Dowd-Urbe B., Schnurr M.A., 2016. Briefing: Burkina Faso's reversal on genetically modified cotton and the implications for Africa, *African Affairs*, 115(458), 161-172.
- Duraimurugan P., Regupathy A., 2005. Push-pull strategy with trap crops, neem and nuclear polyhedrosis virus for insecticide resistance management in *Helicoverpa armigera* (Hubner) in cotton, *American Journal of Applied Sciences*, 2(6), 1042-1048.
- Duru M., Sarthou J.-P., Therond O., 2022. L'agriculture régénératrice : summum de l'agroécologie ou greenwashing?, *Cahiers Agricultures*, 31(17).
- Duthurburu H.E.V., 2001. Cultivo ecológico del algodón y otras especies vegetales, *C.I.P. n° 395*, SENASA, 46 p.
- Edula S.R., Bag S., Milner H., Kumar M., Suassuna N.D., Chee P.W. *et al.*, 2023. Cotton leaf roll dwarf diseases: an enigmatic viral disease in cotton, *Molecular Plant Pathology*, 2023, 1-14. <https://doi.org/10.1111/mp.13335>.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2021. Pest categorization of *Elasmopalpus lignosellus*, *EFSA Journal*, 19(6), 1-24. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6663>.
- Ekukole G., 1993. A check list of cotton entomofauna in North Cameroon. II. Parasitoids and predators, *Coton et fibres tropicales*, 48(3), 221-224.
- El-Lissy O., Grefenstette B., 2007. Progress of boll weevil *Anthonomus grandis* eradication in the United States of America, 2005, in *Area-wide control of insects pests: from research to field implementation*, Vreysen M.J.B., Robinson A.S., Hendrichs J. (eds), 547-558.
- Ellsworth P.C., Martinez-Carrillo J.L., 2001. IPM for *Bemisia tabaci*: a case study from North America, *Crop Protection*, 20, 853-869.
- Epiery G., 1997. Insect pest and predator incidence in cotton/bean intercropping system and the surrounding crops in eastern Uganda, *African Crop Science Conference Proceedings*, 3, 1173-1176.
- Eschanov B., Namazov S.E., 2021. Uzbekistan and Turkmenistan, in Matthews G., Miller T. (coord.), 2021, *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 101-112.
- Eyhorn F., Ratter S.G., Mahesh Ramakrishnan M., 2005. *Organic Cotton Crop Guide. A manual for practitioners in the tropics*, 1^{re} édition, Switzerland, FiBL (ed.), Research Institute of Organic Agriculture, 66 p.
- Faust R.M., 2008. General introduction to areawide pest management, in *Areawide pest Management. Theory and implementation*, Chapter 1, Koul O., Cuperus G., Elliott N. (eds), CABI, 1-14.
- Fausto da Silva A.K., Romanel E., da F. Silva T., Castilhos Y., Schrago C.G., Galbieri R. *et al.*, 2015. Complete genome sequence of two new virus isolates associated with cotton blue disease resistance breaking in Brazil, *Archives of Virology*, 160(5), 1371-1374. <https://doi.org/10.1007/s00705-015-2380-8>.
- Fauvergue X., Rusch A., Barret M., Bardin M., Jacquin-Joly E., Malausa T. (coord.) *et al.*, 2020. *Biocontrôle. Éléments pour une protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 375 p.
- Favoreto L., Faleiro V.O., Freitas M.A., Brauwiers L.R., Galbieri R., Homiak J.A. *et al.*, 2018. First report of *Aphelenchoides besseyi* infecting the aerial part of cotton plants in Brazil, *Plant Disease*, 102(12), 2662. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-18-0334-PDN>.
- Fédière G., El-Sheikh M.A.K., Khamiss O., Masri M., Salah M., 1999. Isolation of densovirus and picornavirus from natural field populations of *Spodoptera littoralis* Bois. (Lep. Noctuidae) in Egypt, *J. Agric. Sci. Mansoura Univ*, 24(11), 6945-6953.
- Fédière G., El-Sheikh M.A.K., El Mergawy R., Salah M., Masri M., Abol-Ela S. *et al.*, 2003. Record of densoviral diseases occurring among the noctuid populations in lucerne fields at El-Bahareya oasis in Egypt, *IOBC WPRS Bulletin*, 26(1), 237-240.
- Ferguson C., Ali A., 2023. Cotton blue disease from Africa and its de facto relationship with cotton leaf roll dwarf virus: a misleading etiological discrepancy, *Frontiers in virology*, 3:1253174. <https://doi.org/10.3389/fviro.2023.1253174>.

- Fernandes F.S., Ramalho F.S., Nascimento A.R.B., Malaquias J.B., Da Silva C.A.D., Zanoncio J.C., 2012. Within-plant distribution of cotton aphid (Hemiptera: Aphididae), in cotton with colored fibers and cotton-fennel intercropping system, *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 105(4), 599-607.
- Fernandes F., Godoy W.A.C., Ramalho F.S., Malaquias J.B., Santos B.D.B., 2018. The behavior of *Aphis gossypii* and *Aphis craccivora* (Hemiptera: Aphididae) and their predator *Cycloneda sanguinea* (Coleoptera: Coccinellidae) in cotton-cowpea intercropping system, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(1), 373-383.
- Ferron P., 2016. Introduction, in Deguine J.-P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.-N. (coord.), *Protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 17-21.
- Ferron P., Deguine J.-P., 2005a. Crop protection, biological control, habitat management and integrated farming. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 17-24.
- Ferron P., Deguine J.-P., 2005b. Vers une conception agroécologique de la protection des cultures, In Régnauld-Roger C (coord.), *Enjeux phytosanitaires pour l'agriculture et l'environnement*, Doc Lavoisier (eds.), 347-366.
- FiBL, 2022. Trainer's guide to the organic cotton training curriculum (OCTC) for India. The organic cotton accelerator (OCA) version 1.0, June 2022, 104 p.
- Fitt G.P., 1994. Cotton pest management, *Annual Review of Entomology*, 39, 543-562.
- Fitt G.P., 2000. An Australian approach to IPM in cotton: integrating new technologies to minimise insecticide dependence, *Crop Protection*, 19, 793-800.
- Fitt G., Wilson L., Kelly D., Mensah R., 2009. Advances with IPM as a component of sustainable agriculture: the case of the Australian cotton industry, in *Integrated pest management. Volume 2: Dissemination and impact*, Peshin R., Dhawan A.K. (eds.), Netherlands, Springer, 507-524.
- Fleischer S.J., Gaylor M.J., 1987. Seasonal abundance of *Lygus lineolaris* (Heteroptera: Miridae) and selected predators in early season uncultivated hosts: implications for managing movement into cotton, *Environmental entomology*, 16(2), 379-389.
- Flores-Rivera X.L., Paula-Moraes S.V., Johnson J.W., Jack C.J., Perera O.P., 2022. *Helicoverpa* genus on the edge of the continental U.S.: flight phenology, analysis of hybrid presence, and insecticide performance in high-input field crops in Puerto Rico, *Front. Insect Sci.*, 2, 1010310. <https://doi.org/10.3389/finsc.2022.1010310>.
- Fok M., 2016. Impacts du coton-Bt sur les bilans financiers des sociétés cotonnières et des paysans au Burkina Faso, *Cahiers Agricultures*, 25, 35001. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016020>.
- Follin J.-C., 1982. La virescence florale (« phyllodie ») du cotonnier en Côte d'Ivoire. Possibilité de lutte, *Coton et fibres tropicales*, 37, 179-181.
- Frisbie R.E., El-Zik K.M., Wilson L.T. (eds.), 1989. *Integrated pest management systems and cotton production*, New York, Wiley Interscience, 438 p.
- Fye R.E., 1971. Grain sorghum - a source of insect predators for insects on cotton, *Prog. Agric. Arizona*, 23(1), 12-13.
- Fye R.E., 1972. The interchange of insect parasites and predators between crops, *PANS*, 18(2), 143-146.
- Gahukar R.T., 1991. Control of cotton insect and mite pests in subtropical Africa: Current status and future needs, *International Journal of Tropical Insect Science*, 12(4), 313-338.
- Galbieri R., Cia E., Fuzatto M.G., Franzon R.C., Bélot J.-L., Caram de Souza Dias J.A., 2010. Transmissibilidade e reação de genótipos de algodoeiro a uma forma atípica do vírus do mosaico das nervuras, *Tropical Plant Pathology*, 35, 88-95.
- Galichet P.F., 1964. La diapause et sa signification écologique chez *Diparopsis watersi* Rothschild Agrotidae, Lepidoptera, ravageur du cotonnier en Afrique centrale, thèse de docteur-ingénieur, faculté des sciences de Toulouse, 209 p.

- Galichet P.F., 1965. *Diparopsis watersi* Rothschild, Lepidoptera, Noctuidae, ravageur du cotonnier en Afrique centrale, thèse de docteur-ingénieur, spécialité Écologie des populations, faculté des sciences de l'université de Toulouse, 84 p.
- Genay J.P., 1994. Trois années d'expérimentation phytosanitaire sur cotonnier en Thaïlande (1991-1993), bilan et perspectives, Cirad-CA, 38 p.
- Gillet F.-X., Garcia R.A., Macedo L.L.P., Albuquerque E.V.S., Silva M.C.M., Grossi-de-Sa M.F., 2017. Investigating engineered ribonucleoprotein particles to improve oral RNAi delivery in crop insect pests, *Frontiers in physiology*, 8, 256. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00256>.
- Giller K.E., Hijbeek R., Andersson J.A., Sumberg J., 2021. Regenerative agriculture: an agronomic perspective, *Outlook on agriculture*, 50(1), 13-25.
- Giller K.E., 2022. Why the buzz on regenerative agriculture?, *Growing Africa*, 1(1), 12-16. <https://doi.org/10.55693/ga11.kdvj45831>.
- Gliessman S. R., 2015. *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*, 3^e édition, Boca Raton, 405 p.
- Gliessman S., 2016a. Transforming food systems with agroecology, *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, 40, 187-189. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765>.
- Gliessman S., 2016b. The five levels of food system transformation, in *Agroecology: The Bold Future of Farming in Africa.*, Tanzania, AFSA, TOAM Eds., 84-85.
- Gliessman S.R., Méndez V.E., Izzo V.M., Engles E.W., Gerlicz A. (coord.), 2022. *Agroecology leading the transformation to a just and sustainable food system*, 4^e édition, CRC Press, 470 p.
- Godfrey L.D., Leigh T.F., 1994. Alfalfa harvest strategy effect on *Lygus* bug (Hemiptera: Miridae) and insect predator population density implications for use as trap crop in cotton, *Environ. Entomol.*, 23(5), 1106-1118.
- Goergen G., 2018. Southern armyworm, a new alien invasive pest identified in West and Central Africa, *Crop Protection*, 112, 371-373.
- Goergen G., Kumar P.L., Sankung S.B., Togola A., Tamò M., 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa, *PLoS ONE*, 11, e0165632.
- Gomgnimbou A.P.K., Savadogo P.W., Nianogo A.J., Millogo-Rasolodimby J., 2009. Usage des intrants chimiques dans un agrosystème tropical : diagnostic du risque de pollution environnementale dans la région cotonnière de l'est du Burkina Faso, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13, 499-507.
- Gonzalez Bachini J.E., 1982. Manual de evaluacion y control de insectos y acaros del algodono. Boletín técnico n° 1, Fundacion para el desarrollo algodono, 71 p.
- Goodell P.B., 2009. Fifty years of the integrated control concept: the role of landscape ecology in IPM in San Joaquin valley cotton, *Pest Manag. Sci.*, 65, 1293-1297.
- Gouda A.-I., Imorou Toko I., Salami S.-D., Richert M., Scippo M.-L., Kestemont P. *et al.*, 2018. Pratiques phytosanitaires et niveau d'exposition aux pesticides des producteurs de coton du nord du Bénin, *Cahiers Agricultures*, 27, 65002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018038>.
- Gourlot J.-P., Drieling A., 2021. Steps towards suitable stickiness test results for trading and processing, International Cotton Conference Bremen Lectures, 23 p. <https://baumwollboerse.de/en/cotton-conference/lectures/>.
- Gowda A., Rydel T.J., Wollacott A.M., Brown R.S., Akbar W., Clark T.L. *et al.*, 2016. A transgenic approach for controlling *Lygus* in cotton, *Nature communications*, 7, 12213. <https://doi.org/10.1038/ncomms12213>.
- Gozé E., Nibouche S., Deguine J.-P., 2003. Spatial and probability distribution of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton: systematic sampling, exact confidence intervals and sequential test, *Environ. Entomol.*, 32(5), 1203-1210.

- Green M.B., Lyon D.J. de B. (eds.), 1989. *Pest management in cotton*, Chichester, Ellis Horwood, 259 p.
- Greenberg S.M., Parajulee M.N., 2017. Integrated pest management in cotton, in *Integrated pest management in tropical regions*, C. Rapisarda, Coccuzza G.E.M. (eds), 134-174.
- Greenberg S.M., Liu T.-X., Adamczyk J.J., 2009. *Thrips* (Thysanoptera: Thripidae) on cotton in the Lower Rio Grande Valley of Texas: species composition, seasonal abundance, damage, and control, *Southwestern Entomologist*, 34(4), 417-430.
- Greenberg S.M., Adamczyk J.J., Armstrong J.S., 2012. Principles and practices of integrated pest management on cotton in the Lower Rio Grande valley of Texas, in *Integrated Pest Management and pest control – current and future tactics*, Larramendy M.L., Soloneski S. (eds), 1-34.
- Gregg P.C., Greive K.A., Del Socorro A.P., Hawes A., 2010. Research to realisation: the challenging path for novel pest management products in Australia, *Australian Journal of Entomology*, 49, 1-9.
- Griebler M., Westerlund S.A., Hoffmann K.H., Meyering-Vos M., 2008. RNA interference with the allatoregulating neuropeptide genes from the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* and its effects on the JH titer, *Journal of Insect Physiology*, 54, 997-1007.
- Grison P., Biliotti E., 1953. La signification agricole des « stations-refuges » pour la faune entomologique, *Compte-rendu de l'Académie d'agriculture de France*, 39(2), 106-109.
- Gupta M., Singh S., Kaur G., Pandher S., Kaur N., Goel N. *et al.*, 2021. Transcriptome analysis unravels RNAi pathways genes and putative expansion of CYP450 gene family in cotton leafhopper *Amrasca biguttula* (Ishida), *Molecular biology reports*, 48, 4383-4396.
- Gurr G.M., Liu J., Read D.M.Y., Catindig J.L.A., Cheng J.A., Lan L.P., Heong K.L., 2011. Parasitoids of Asian rice planthopper (Hemiptera: Delphacidae) pests and prospects for enhancing biological control by ecological engineering, *Annals of Applied Biology*, 158, 149-176.
- Gurr G.M., Read D.M.Y., Catindig J.L.A., Cheng J., Liu J., Lan L.P. *et al.*, 2012. Parasitoids of the rice leafhopper *Cnaphalocrocis medinalis* and prospects for enhancing biological control with nectar plants, *Agricultural and Forest Entomology*, 14, 1-12.
- Gurr G.M., Wratten S.D., Landis D.A., You M., 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects, *Annual Review of Entomology*, 62, 91-109.
- Gutierrez J., 1992. Les acariens déprédateurs du cotonnier, *Coton et fibres tropicales*, 47(3), 153-172.
- Gvozdenac S., Dedic B., Mikic S., Ovuka J., Miladinovic D., 2023. Chapter 14. Impact of climate change on integrated pest management strategies, in *Climate change and agriculture : perspectives, sustainability and resilience*, 1^{re} édition, Benkeblia N. (ed.), John Wiley, Sons Ltd, 311-372.
- Hagenbucher S., Olson D.M., Ruberson J.R., Wäckers F.L., Romeis J., 2013. Resistance mechanisms against arthropod herbivores in cotton and their interactions with natural enemies, *Critical reviews in plant sciences*, 32, 458-482.
- Hagenbucher S., Eisenring M., Meissle M., Rathore K.S., Romeis J., 2019. Constitutive and induced insect resistance in RNAi-mediated ultra-low gossypol cottonseed cotton, *BMC Plant Biology*, 19, 322. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1921-9>.
- Hake S.J., Hake K.D., Kerby T.A., 1996. Mid- to late-bloom decisions, in *Cotton production manual*, Hake S.J., Kerby T.A., Hake K.D. (eds), University of California, 64-72.
- Harper J.D., Carner G.R., 1996. Biology, ecology and epidemiology of microbial organisms infecting arthropod pests, in *Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis Tennessee, King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 163-202.
- Heinz K.M., Brazzle J.R., Parrella M.P., Pickett C.H., 1999. Field evaluations of augmentative releases of *Delphastus catalinae* (Horn) (Coleoptera: Coccinellidae) for suppression of *Bemisia argentifolii* Belows, Perring (Homoptera: Aleyrodidae) infesting cotton, *Biological Control*, 16, 241-251.

- Henneberry T.J., 2007. Integrated systems for control of the pink bollworm *Pectinophora gossypiella* in cotton, in *Area-wide control of insects pests: from research to field implementation*, Vreysen M.J.B., Robinson A.S., Hendrichs J. (eds), 567-579.
- Herrera Aratniguera J.M., 1961. Problemas entomológicos en el cultivo de los algodones Tangüis y Pima en el Perú. Medidas de control y su organización, *Revista peruana de entomología agrícola*, 4(1), 58-66.
- Hill S.B., 2014. Considerations for enabling the ecological redesign of organic and conventional agriculture: a social ecology and psychological perspective, in *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*, Bellon S., Penvern S., Eds., Springer, 401-422. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7927-3_22.
- Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture, *J. Sust. Agric.*, 7, 81-87.
- Hill S.B., Vincent C., Chouinard G., 1999. Evolving ecosystems approaches to fruit pest management, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73, 107-110.
- Hillocks R.J., 1995. Integrated management of insect pests, diseases and weeds of cotton in Africa, *Integrated Pest Management Reviews*, 1, 31-47.
- Hillocks R.J., 2005. Is there a role for Bt cotton in IPM for smallholders in Africa?, *International Journal of Pest Management*, 51, 131-141.
- Hillocks R., Russell D., 2014. Promoting integrated pest management for cotton smallholders – The Uganda experience, in *Integrated Pest Management*, Peshin R., Pimentel D. (eds), Springer Science, 349-364.
- Hofs J.-L., 1992. Utilisation des caractères variétaux de résistance aux ravageurs sur cotonnier : synthèse, Tchad, *Revue scientifique du Tchad*, 2(1-2), 66-73.
- Horne P.A., Page J., Nicholson C., 2008. When will integrated pest management strategies be adopted? Example of the development and implementation of integrated pest management strategies in cropping systems in Victoria, *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 1601-1607.
- Horowitz A.R., Breslauer H., Rippa M., Kontsedalov S., Ghanim M., Weintraub P. et al., 2011. Dynamics of biotypes 'b' and 'q' of *Bemisia tabaci* in cotton fields and their relevance to insecticide resistance, *Proceedings of the World Cotton Research Conference-5*, Mumbai, India, November 7-11, 232-238.
- Houndété T.A., Kétoh G.K., Hema O.S.A., Brévault T., Glitho I.A., Martin T., 2010. Insecticide resistance in field populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in West Africa, *Pest Manag. Sci.*, 66, 1181-1185.
- Huang F., Andow D.A., Buschman L.L., 2011a. Success of the high-dose refuge resistance management strategy after 15 years of Bt crop use in North America, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 140, 1-16.
- Huang F., Andow D.A., Buschman L.L., 2011b (corrigendum). Success of the high-dose refuge resistance management strategy after 15 years of Bt crop use in North America, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 141, 262.
- Huang J., Hao H., 2020. Effects of climate change and crop planting structure on the abundance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), *Ecology and evolution*, 10, 1324-1338.
- Huang Y., Sui R., Thomson S.J., Fisher D.K., 2013. Estimation of cotton yield with varied irrigation and nitrogen treatments using aerial multispectral imagery, *Int. J. Agric., Biol. Eng.*, 6(2), 37-41.
- Huang Y., Chen Y., Zeng B., Wang Y., James A.A., Gurr G.M. et al., 2016. CRISPR/Cas9 mediated knockout of the *abdominal-A* homeotic gene in the global pest, diamondback moth (*Plutella xylostella*), *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 75, 98-106.

- ICAC (International Cotton Advisory Committee), 1993. Production organique de coton, *The ICAC Recorder*, 11(1), 28-31. https://staging.icac.org/cotton_info/tis/organic_cotton/documents/1993/f_march.pdf.
- ICAC, 2020. Potential impacts of COVID-19 on the cotton sector, *The ICAC Recorder Special Issue*, 38(2), 1-95.
- ISAAA, 2019. Global status of commercialized biotech/GM Crops in 2019: *Biotech crops drive socio-economic development and sustainable environment in the new frontier*, ISAAA Brief, 55, 100 p.
- James C., 2011. Global status of commercialized biotech/GM Crops in 2011, *ISAAA Brief*, 43.
- Janangir A., Muhammad S., Najrul I., Khairul H.A., Abdul K., 2022. Detopping is an option to reduce field duration of cotton without affecting the yield and quality of cotton fiber, in *Book of papers of the World Cotton Research Conference-7*, Cairo, Egypt, October 4-7, 315-321.
- Javaid I., 1990. Application of insecticides on cotton in Zambia: timing of spray applications, *Tropical Pest Management*, 36(1), 1-9.
- Jenkins J.N., 1994. Host plant resistance to insects in cotton, *Proceedings of the World Cotton Research Conference-1*, Brisbane, Australia, February 14-17, 359-372.
- Jenkins J.N., McCarty Jr. J.C., 1994. Comparison of four cotton genotypes for resistance to *Heliothis virescens*, *Crop Science*, 34(5), 1231-1233.
- Jenkins J.N., Wilson F.D., 1996. Host plant resistance. Chapter 17, in *Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis Tennessee, King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 563-597.
- Jenkins J.N., Parrott W.L., McCarty J.C., Earnheart A.T., 1978. Evaluation of primitive races of *Gossypium hirsutum* L. for resistance to boll weevil, *Technical Bulletin* 91, USDA-ARS, Mississippi State, 12 p.
- Jenkins J.N., McCarty Jr. J.C., Moghal M.S., 1995. Rearing tobacco budworm and bollworm for host plant resistance research, *Technical Bulletin* 208, Mississippi State University, 8 p.
- Kabissa J.C.B., 1989. Evaluation of damage thresholds for insecticidal control of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) on cotton in eastern Tanzania, *Bulletin of Entomological Research*, 79, 95-98.
- Kabissa J.C.B., Temu E., Ng'Homa M., Mrosso F., 1997. Control of cotton pests in Tanzania: progress and prospects, African Crop Science Conference Proceedings, Pretoria, 13-17 January 1997, E. Adipala, J.S. Tenywa, M.W. Ogenga-Latigo (Eds.), 3, 1159-1166.
- Kabissa J., Elobu P., Muriithi A., 2021. Cotton growing in East Africa, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 156-184.
- Karpun N.N., Zhuravleva E.N., Shoshina E.I., Kirichenko N.I., 2022. The detection of an alien pest, the cotton leaf roller *Haritalodes derogata* (Lepidoptera: Crambidae), on the Black Sea Coast of Russia, *Far Eastern Entomologist*, 465, 12-21.
- Kempel A., Brandl R., Schädler M., 2009. Symbiotic soil micro-organisms as players in aboveground plant-herbivore interactions – the role of rhizobia, *Oikos*, 118, 634-640.
- Kfir R., Van Hamburg H., 1983. Further tests of threshold levels for the control of cotton bollworms (mainly *Heliothis armiger*), *J. ent. Soc. sth. Afr.*, 46(1), 49-58.
- Khan A.M., Ashfaq M., Khan A.A., Naseem M.T., Mansoor S., 2018. Evaluation of potential RNA-interference-target genes to control cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae), *Insect Science*, 25, 778-786.
- Kim D.S., Zhang J., 2023. Strategies to improve the efficiency of RNAi-mediated crop protection for pest control, *Entomologia Generalis*, 43(1), 5-19.
- Kim Y.H., Issa M.S., Cooper A.M.W., Zhu K.Y., 2015. RNA interference: applications and advances in insect toxicology and insect pest management, *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 120, 109-117.

- King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 1996. *Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis, Tennessee, USA, 1008 p.
- Knight R.L., 1952. The genetics of jassid resistance in cotton. I. The genes H1 and H2, *J. Genet.*, 51, 47-66.
- Knight I.A., Rains G.C., Culbreath A.K., Toews M.D., 2017. Thrips counts and disease incidence in response to reflective particle films and conservation tillage in cotton and peanut cropping systems, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 162, 19-29.
- Kobenan K.C., Kouakou B.J., Kouakou M., Kouadio B.K.N., Kouadio E.N., Tehia K.E. *et al.*, 2022a. Essential oils used as bioinsecticides against two main biting-sucking insects (*Bemisia tabaci* Gennadius and *Jacobiella fascialis* Jacobi) and for the improvement of seed and fiber quality of cotton plants in Ivory Coast, Books of papers of the World Cotton Research Conference-7, 4-7 October 2022, Cairo, Egypt, 639-669.
- Kobenan K.C., Ochou G.E.C., Kouadio I.S., Kouakou M., Bini K.K.N., Ceylan R. *et al.*, 2022b. Chemical composition, antioxidant activity, cholinesterase inhibitor and *in vitro* insecticidal potentiality of essential oils of *Lippia multiflora* Moldenke and *Eucalyptus globulus* Labill. on the main carophagous pests of cotton plant in Ivory Coast, *Chemistry and Biodiversity*, 19, e202100993.
- Koch R.L., 2003. The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: a review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts, *Journal of Insect Science*, 3(32), 1-16.
- Kogan M., 1998. Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments, *Annual Review of Entomology*, 43, 243-270.
- Kogan M., Higley L. (eds.), 2019. *Integrated management of insect pests. Current and future developments*, Philadelphia, USA, Burleigh Dodds Series in Agriculture science, 600 p.
- Kogan M., Heinrichs E.A. (eds), 2020. *Integrated management of insect pests. Current and future developments*, Philadelphia, USA, Burleigh Dodds Series in Agriculture science, 976 p.
- Kouadio H., Kouakou M., Bini K.K.N., Ouattara M.A.-N., Adepo-Gourène B.A., Ochou O.G., 2022. Diagnostic des attaques de jassides sur des parcelles de gombos et d'aubergines au centre et au centre ouest de la Côte d'Ivoire, *International Journal of innovation and Applied Studies*, 38(2), 408-416.
- Kpadé P.C., Mensah E.R., 2013. Facteurs d'adoption de la lutte étagée ciblée au Nord-Bénin, *Economie rurale*, 338, 77-91.
- Kranthi K.R., Russell D.A., 2009. Changing trends in cotton pest management. Chap. 17, *in Integrated pest management. Volume 1: Innovation-development process*, Peshin R., Dhawan A.K. (eds.), Springer Netherlands, 499-541.
- Kranthi K.R., Stone G.D., 2020. Long-term impacts of Bt cotton in India, *Nature Plants*, 6, 188-196.
- Kranthi K.R., 2024. Pesticide use in cotton and other crops. A recent global perspective, *The ICAC Recorder*, 54 p.
- Kranthi S., Kranthi K.R., Kumar R., Dharajothi, Udikeri S.S., Prasad Rao G.M.V. *et al.*, 2011. Emerging and key insect pests on Bt cotton – their identification, taxonomy, genetic diversity and management, *Proceedings of the World Cotton Research Conference-5*, Mumbai, India, November 7-11, 281-286.
- Kuklinski F., 2000. Les ravageurs de la culture cotonnière Malagasy, avec une attention particulière à *Aphis gossypii* et ses ennemis naturels, doc DPV/GTZ Hasy Malagasy, 197 p.
- Kuklinski F., Borgemeister C., 2002. Cotton pests and their natural enemies in Madagascar, *Journal of Applied Entomology*, 126(2-3), 55-65.
- Kumar M., Gupta G.P., Rajam M.V., 2009. Silencing of acetylcholinesterase gene of *Helicoverpa armigera* by siRNA affects larval growth and its life cycle, *Journal of Insect Physiology*, 55, 273-278.

- Kumar R., Nagrare V.S., Rao N., Kumar A., Deepak, Beniwal V., 2022. Within plant distribution, dynamics and ecocompatible management of thrips (Thripidae: Thysanoptera), an emerging pest of cotton in India, *in Book of papers of the World Cotton Research Conference-7*, Cairo, Egypt, October 4-7, 540-549.
- Laboucheix J., Van Offeren A.L., Desmitds M., 1973. Étude de la transmission par *Orosius cellulosus* Lindberg de la virescence florale du cotonnier et de *Sida* sp., *Coton et fibres tropicales*, 33(4), 461-471.
- Lagière R.L., 1966. *Le cotonnier. Techniques agricoles et productions tropicales*, Paris, France G.-P. Maisonneuve et Larose (eds.), 306 p.
- Lahiri S., Roberts P.M., Toews M.D., 2019. Role of tillage, thiamethoxam seed treatment, and foliar insecticide application for management of *Thrips* (Thysanoptera: Thripidae) in seedling cotton, *Journal of Economic Entomology*, 112(1), 181-187.
- Lamichhane J.R., Arendse W., Dachbrodt-Saaydeh S., Kudsk P., Roman J.C., van Bijsterveldt-Gels J.E.M. *et al.*, 2015. Challenges and opportunities for integrated pest management in Europe: a telling example of minor uses, *Crop Protection*, 74, 42-47.
- Lamichhane J.R., Aubertot J.-N., Begg G., Birch A.N., Boonekamp P., Dachbrodt-Saaydeh S. *et al.*, 2016. Networking of integrated pest management: a powerful approach to address common challenges in agriculture, *Crop Protection*, 89, 139-151.
- Lamichhane J.R., Akbas B., Bo Andreasen C., Arendse W., Bluemel S., Dachbrodt-Saaydeh S. *et al.*, 2018. A call for stakeholders to boost integrated pest management in Europe: a vision based on the three-year European research area network project, *International Journal of Pest Management*, 64(4), 352-358. <https://doi.org/10.1080/09670874.2018.1435924>.
- Laçon J., 1996. Le cotonnier *glandless* : 350 000 hectares en 1994, *Agriculture et développement*, 9, 3-12.
- Lazo M.P., Travaglini L.A., Ochoa R.V., Hernández E.C., Segovia I., 2003. Integrated pest management in Peru. Chapter 23, *in Integrated pest management in the global arena*, Marédia K.M., Dakouo D., Mota-Sanchez D. (eds), CABI, 301-312.
- Le Bars M., Sidibe F., Mandart E., Fabre J., Le Grusse P., Diakite C.H., 2020. Évaluation des risques liés à l'utilisation de pesticides en culture cotonnière au Mali, *Cahiers Agricultures*, 29. <https://doi.org/10.1051/cagri/2022023>.
- Le Gall J., 1951. Rapport du service entomologique pour la campagne cotonnière 1949-1050. Tikem, Tchad, IRCT, 87 p.
- Le Goff G., Nauen R., 2021 (eds). Recent advances in the understanding of molecular mechanisms of resistance in Noctuid pests, *Insects*, 157 p.
- Leigh T.F., Roach S.H., Watson T.F., 1996. Biology and ecology of important insect and mite pests of cotton, *in Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis, Tennessee, King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 17-85.
- Léry X., Khamiss O., Nour-El-Din A., Giannotti J., Abol-Ela S., 1997. Multiplication of *Spodoptera littoralis* ganulosis virus in a cell line established from *Phthorimaea operculella*, *Acta virologia*, 41, 169-174.
- Levard L., Bertrand M., Masse P. (coord.), 2019. Mémento pour l'évaluation de l'agroécologie. Méthodes pour évaluer ses effets et les conditions de son développement, GTAE-AgroParis-Tech-Cirad-IRD, 135 p.
- Li H., Pan H., Wang D., Liu B., Liu J., Zhang J. *et al.*, 2018. Intercropping with fruit trees increases population abundance and alters species composition of spider mites on cotton, *Environmental entomology*, 47(4), 781-787.
- Li H., Li Q., Wang D., Liu J., Zhang J., Lu Y., 2020. Effect of a cotton intercrop on spider mite populations in jujube trees, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23, 167-171.

- Li J., Liu B., Pan H., Luo S., Wyckhuys K.A.C., Yuan H. *et al.*, 2019. Buckwheat strip crops increase parasitism of *Apolygus lucorum* in cotton, *BioControl*, 64, 645-654.
- Li L., Zhu Y., Jin S., Zhang X., 2014. Pyramiding *Bt* genes for increasing resistance of cotton to two major lepidopteran pests: *Spodoptera litura* and *Heliothis armigera*, *Acta Physiol. Plant*, 36, 2717-2727. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1642-5>.
- Lin R., Liang H., Zhang R., Tian C., Ma Y., 2003. Impact of alfalfa/cotton intercropping and management on some aphid predators in China, *J. Appl. Ent.*, 127, 33-36.
- Liu B., Yang L., Yang F., Wang Q., Yang Y., Lu Y. *et al.*, 2016. Landscape diversity enhances parasitism of cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*) eggs by *Trichogramma chilonis* in cotton, *Biological Control*, 93:15-23.
- Llandres A.L., Almohamad R., Brévault T., Renou A., Téréta I., Jean J. *et al.*, 2018. Plant training for induced defense against insect pests: a promising tool for integrated pest management in cotton, *Pest Management Science*, 74, 2004-2012.
- López J.D. Jr., Sterling W.L., Nordlund D.A., 1996. Biology and ecology of important predators and parasites attacking arthropod pests, in *Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis, Tennessee, King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 87-142.
- Lourens J.H., Van Der Laan P.A., Brader L., 1972. Contribution à l'étude d'une « mosaïque » du cotonnier au Tchad : distribution dans un champ ; Aleurodidae communs ; essais de transmission de cotonnier à cotonnier par les Aleurodidae, *Coton et fibres tropicales*, 27, 225-231.
- Lowder S.K., Skoet J., Raney T., 2016. The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide, *World Dev.*, 87, 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>.
- Lu Y., Wu K., 2011. Mirid bugs in China: pest status and management strategies, *Outlooks on pest management*, 22(6), 248-252.
- Lu Y., Wu K., Jiang Y., Xia B., Li P., Feng H. *et al.*, 2010. Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China, *Science*, 328, 1151-1154.
- Luo J., Liang S., Li J., Xu Z., Li L., Zhu B. *et al.*, 2017. A transgenic strategy for controlling plant bugs (*Adelphocoris suturalis*) through expression of double-stranded RNA homologous to fatty acyl-coenzyme A reductase in cotton, *New Phytologist*, 215, 1173-1185.
- Luo S., Naranjo S.E., Wu K., 2014. Biological control of cotton pests in China, *Biological Control*, 68, 6-14.
- Luttrell R.G., 1994. Cotton pest management, *Annual Review of Entomology*, 39, 527-542.
- Luttrell R.G., Fitt G.P., Ramalho E.S., Sugonyaev E.S., 1994. *Annual Review of Entomology*, 39, 517-526.
- Lv W., Zhao X., Wu P., Lv J., He H., 2021. A scientometric analysis of worldwide intercropping research based on web of science database between 1992 and 2020, *Sustainability*, 13, 2430. <https://doi.org/10.3390/su13052430>.
- Lv Q., Chi B., He N., Zhang D., Dai J., Zhang Y. *et al.*, 2023. Cotton-based rotation, intercropping, and alternate intercropping increase yields by improving root-shoot relations, *Agronomy*, 13, 413. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020413>.
- Lykouressis D., Perdakis D., Samartzis D., Fatinou A., Toutouzias S., 2005. Management of the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) by mating disruption in cotton fields, *Crop Protection*, 24, 177-183.
- Ma X.M., Liu X.X., Zhang Q.W., Zhao J.Z., Cai Q.N., Ma Y.A. *et al.*, 2006. Assessment of cotton aphids, *Aphis gossypii*, and their natural enemies on aphid-resistant and aphid-susceptible wheat varieties in a wheat-cotton relay intercropping system, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 121, 235-241.
- Macedo L.L.P., de Souza Junior J.D.A., Coelho R.R., Fonseca F.C.A., Firmino A.A.P., Silva M.C.M. *et al.*, 2017. Knocking down chitin synthase 2 by RNAi is lethal to the cotton boll weevil, *Biotechnology Research and Innovation*, 1, 72-86.

- Mafra-Neto A., Habib M., 1996. Evidence that mass trapping suppresses pink bollworm populations in cotton fields, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 81, 315-323.
- Mahama A., Cauquil J., 1976. La sélection de variétés résistantes à la maladie bleue du cotonnier dans l'Empire centrafricain, *Coton et fibres tropicales*, 31, 439-446.
- Maino J.L., Schouten R., Overton K., Day R., Reynolds O.L., 2021. Regional and seasonal activity predictions for fall armyworm in Australia, *Curr. Res. Insect Sci.*, 1, 100010.
- Mallamaire A., 1949. Note sur quelques insectes parasites et sur quelques maladies des plantes cultivées dans les terres irriguées de l'Office du Niger, *Coton et fibres tropicales*, 4(1), 19-24.
- Manessi O. G., 1997. *Anthonomus grandis* Boh. El picudo mexicano del algodonero. La super plaga, FULCPA, Santa Fe, Argentina, 594 p.
- Mao Y.-B., Cai W.-J., Wang J.-W., Hong G.-J., Tao X.-Y., Wang L.-J. et al., 2007. Silencing a cotton bollworm P450 monooxygenase gene by plant-mediated RNAi impairs larval tolerance of gossypol, *Nature Biotechnology*, 25(11), 1307-1313.
- Mao Y.-B., Tao X.-Y., Xue X.-Y., Wang L.-J., Chen X.-Y., 2011. Cotton plants expressing *CYP6AE14* double-stranded RNA show enhanced resistance to bollworms, *Transgenic Research*, 20, 665-673.
- Mao J., Zhang P., Liu C., Zeng F., 2015. Co-silence of the *coatome* β and *v-ATPase A* genes by siRNA feeding reduces larval survival rate and weight gain of cotton bollworm, *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 118, 71-76.
- Marengo Lozada R.M., Alvarez L.A., Whitcomb W.H., 1987. El picudo mejicano del algodonero, *Anthonomus grandis* Boh. El desafio para la produccion algodonera en el Paraguay. Ministerio de agricultura y ganaderia, Direccion de investigacion y extension agropecuaria y forestal, Asuncion, Paraguay, 94 p.
- Marks R.J., Hall D.R., Lester R., Nesbitt B.F., Lambert M.R.K., 1981. Further studies on mating disruption of the red bollworm, *Diparopsis castanea* Hampson (Lepidoptera: Noctuidae), with a microencapsulated mating inhibitor, *Bull. Ent. Res.*, 71, 403-418.
- Marquardt S., Dos Santos A., Barsley L., Bhardwaj P., Buermann H., Compson S. et al., 2020. Cotton in Africa: Sustainability at a Crossroads. A white paper outlining the risks of scaling genetically modified cotton in Africa and the opportunities of organic and other preferred cotton initiatives, Pan-Africa Sourcing Working Group, Textile Exchange, United States of America, 1-28.
- Marquié C., 1994. La graine de cotonnier *glandless* dans l'alimentation traditionnelle au Bénin, Cirad-CA, Montpellier, France, 36 p.
- Martin J., Silvie P., Debru J., 2010. Le coton biologique au Paraguay. 1. Construction de la filière et contraintes économiques, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 14(1), 289-297.
- Martin T., Ochou G.O., Hala N'kolo F., Vassal J.M., Vaissayre M., 2000. Pyrethroid resistance in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner), in West Africa, *Pest Management Science*, 56, 549-554.
- Martin T., Ochou G.O., Djihinto A., Traore D., Togola M., Vassal J.-M. et al., 2005. Controlling an insecticide-resistant bollworm in West Africa, *Agriculture Ecosystems, Environment*, 107, 409-411.
- Martins C.B.C., Almeida L.M., Zonta de Carvalho R.C., Castro C.F., Pereira R.A., 2009. *Harmonia axyridis*: a threat to Brazilian Coccinellidae?, *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(4), 663-671.
- Marzachi C., Coulibaly A., Coulibaly N., Sangaré A., Diarra M., De Gregorio T., Bosco D., 2009. Cotton virescence phytoplasma and its weed reservoir in Mali, *Journal of Plant Pathology*, 91(3), 717-721.
- Matthess A., Van den Akker E., Chougourou D., Midingoyi Jr. S., 2005. Le coton au Bénin. Compétitivité et durabilité de cinq systèmes culturaux cotonniers dans le cadre de la filière, GTZ (ed.), 206 p.
- Matthews G.A., 1989. *Cotton Insect pests, their management*, Longman Scientific, 199 p.

- Matthews G.A., 1990. Changes in application techniques used by the small scale cotton farmer in Africa, *Tropical Pest Management*, 36(2), 166-172.
- Matthews G.A., 1993. Biological control takes precedence in Uzbekistan cotton, *Pesticide Outlook*, 4(4), 36-38.
- Matthews G., 2021. Cotton growing along the Nile, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 113-128.
- Matthews G., Grundy P., 2021. Cotton growing in Australia, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 216-224.
- Matthews G., Miller T. (coord.), 2021. *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 306 p.
- Matthews G.A., Tunstall J.P., 1968. Scouting for pest and the timing and spray applications, *Cotton Growing Review*, 45, 115-127.
- Matthews G., Tunstall J.P., 1994. *Insect pests of cotton*, CABI, 593 p.
- Matthews G., Tunstall J., 2021. Cotton in Southern Africa, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 129-155.
- Matyjaszczyk E., 2019. Problems of implementing compulsory integrated pest management, *Pest Manag Sci*, 75, 2063-2067.
- McCarty Jr. J.C., Jenkins J.N., Saha S., Wubben M.J., 2021. History of USDA-ARS cotton host plant resistance and breeding research at Mississippi State, MS, *The Journal of Cotton Science*, 25, 101-157.
- McKinley D.J., Moawad G., Jones K.A., Grzywacz D., Turner C., 1989. The development of nuclear polyhedrosis virus for the control of *Spodoptera littoralis* (Boisd.) in cotton, in *Pest management in cotton*, Chichester, Ellis Horwood, 93-100.
- Mead R., Willey R.W., 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping, *Expl. Agric.*, 16, 217-228.
- Men X.Y., Ge F., Yardim E.N., Parajulee M.N., 2004. Evaluation of winter wheat as a potential relay crop for enhancing biological control of cotton aphids in seeding cotton, *BioControl*, 49, 701-714.
- Mensah R.K., 1996. Suppression of *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) oviposition by use of the natural enemy food supplement Envirofeast®, *Australian Journal of Entomology*, 35, 323-329.
- Mensah R.K., 1997. Local density responses of predatory insects of *Helicoverpa* spp. to a newly developed food supplement 'Envirofeast' in commercial cotton in Australia, *International Journal of Pest Management*, 43(3), 221-225.
- Mensah R.K., 1999. Habitat diversity: implications for the conservation and use of predatory insects of *Helicoverpa* spp. in cotton systems in Australia, *International Journal of Pest Management*, 45(2), 91-100.
- Mensah R., 2002a. Development of an integrated pest management programme for cotton. Part 1: establishing and utilizing natural enemies, *International Journal of Pest Management*, 48, 87- 94.
- Mensah R., 2002b. Development of an integrated pest management programme for cotton. Part 2: integration of a Lucerne/cotton interplant system, food supplement sprays with biological and synthetic insecticides, *International Journal of Pest Management*, 48, 95-105.
- Mensah R.K., Khan M., 1997. Use of *Medicago sativa* (L.) interplantings/trap crops in the management of the green mirid *Creontiades dilutus* (Stål) in commercial cotton in Australia, *International Journal of Pest Management*, 43(3), 197-202.
- Mensah R.K., Sequeira R.V., 2004. Chapter 12. Habitat manipulation for insect pest management in cotton cropping systems, in *Ecological engineering for pest management: advances in habitat manipulation for arthropods*, Gurr G., Wratten S., Altieri (eds.), 187-197.
- Mensah R.K., Harris W.E., Beattie G.A.C., 1995. Response of *Helicoverpa* spp. (Lep.: Noctuidae) and their natural enemies to petroleum spray oil in cotton in Australia, *Entomophaga*, 40(2), 263-272.

- Mensah R.K., Vodouhe D.S., Sanfillippo D., Assogba G., Monday P., 2012. Increasing organic cotton production in Benin West Africa with a supplementary food spray product to manage pests and beneficial insects, *International Journal of Pest Management*, 58(1), 53-64.
- Mensah R.K., Gregg P.C., Del Socorro A.P., Moore C.J., Hawes A.J., Watts N., 2013. Integrated pest management in cotton: exploiting behaviour-modifying (semiochemical) compounds for managing cotton pests, *Crop, Pasture Science*, 64, 763-773.
- Mensah R., Moore C., Watts N., Deseo M.A., Glennie P., Pitt A., 2014. Discovery and development of a new semiochemical biopesticides for cotton pest management: assessment of extract effects on the cotton pest *Helicoverpa* spp., *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 152, 1-15.
- Mensah R., Leach D., Young A., Watts N., Glennie P., 2015. Development of *Clitoria terneata* as a biopesticide for cotton pest management: assessment of product effect on *Helicoverpa* spp. and their natural enemies, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 154, 131-145.
- Meyering-Vos M., Merz S., Sertkol M., Hoffmann K.H., 2006. Functional analysis of the allato-statin-A type gene in the cricket *Gryllus bimaculatus* and the armyworm *Spodoptera frugiperda*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 36 492-504.
- Michel B., 1989. Nouvelle contribution à la connaissance des insectes et arachnides rencontrés en culture cotonnière au Paraguay, *Coton et fibres tropicales*, 44, 51-64.
- Michel B., 1992. Informations sur quelques Coccinellidae (Coleoptera) du Paraguay, *Coton et fibres tropicales*, 47, 301-304.
- Michel B., 1993a. Entomofauna de los algodonales paraguayos : Hemiptera Heteroptera, Asunción, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Cirad-CA, Ambassade de France, 132 p.
- Michel B., 1993b. Peuplement entomologique associé au puceron *Aphis gossypii* Glover en culture cotonnière au Paraguay, *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent*, 58/2b, 569-574.
- Michel B., Prudent P., 1987. Prédateurs et parasitoïdes du cotonnier au Paraguay, *Coton et fibres tropicales*, 42, 165-168.
- Michel B., Bournier J.-P., 1997. *Les auxiliaires dans les cultures tropicales/Beneficials in tropical crops*, Cirad éd., 88 p.
- Michel B., Togola M., Vodounnon S., Silvie P., 1999. Développement de nouveaux programmes de protection en Afrique de l'Ouest, *Agriculture et développement*, 22, 77-81.
- Moawad G., Khidr A.A., Zaki M., Critchley B.R., McVeigh L.J., Campion D.G., 1991. Large-scale use of hollow fibre and microencapsulated pink bollworm pheromone formulations integrated with conventional insecticides for the control of the cotton pest complex in Egypt, *Tropical Pest Management*, 37(1), 10-16.
- Moawad G.M., Sawires Z.R., Watson N.W., Gaber A.E., 1994. Male disruption pheromone as a new strategy in controlling pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) in Egypt, *Proceedings of the Beltwide Cotton Conferences*, 1035-1038.
- Morse S., Buhler W., 1997a. *Integrated Pest Management. Ideals and realities in developing countries*, USA, Lynne Rienner Publishers, 171 p.
- Morse S., Buhler W., 1997b. IPM in developing countries: the danger of an ideal, *Integrated Pest Management Reviews*, 2, 175-185.
- Mortuza M.G.G., Miah M.G., Miah M.M.U., Saha S.R., Rizvi J., 2014. Performance of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under aonla (*Emblica officinalis* Gaertn.) based multistoried agroforestry system in Terrace ecosystem of Bangladesh, *Indian Journal of Agroforestry*, 16(2), 1-10.
- Mueller A.J., Stern V.M., 1974. Timing of pesticide treatments on safflower to prevent *Lygus* to dispersing to cotton, *Journal of Economic Entomology*, 67(1), 77-80.
- Nagoshi R.D., Silvie P., Meagher R., 2007a. Comparison of haplotype frequencies differentiate fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) corn-strain populations from Florida and Brazil, *Journal of Economic Entomology*, 100(3), 954-961.

- Nagoshi R.D., Silvie P., Meagher R., Lopez J., Machado V., 2007b. Identification and comparison of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) host strains in Brazil, Texas, and Florida, *Annals of the Entomological Society of America*, 100(3), 394-402. [https://doi.org/10.1603/0013-8746\(2007\)100\[394:IACOFJA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0013-8746(2007)100[394:IACOFJA]2.0.CO;2)
- Nagrare V.S., Kranthi S., Biradar V.K., Zade N.N., Sangode V., Kakde G. *et al.*, 2009. Widespread infestation of the exotic mealybug species, *Phenacoccus solenopsis* (Tinsley) (Hemiptera: Pseudococcidae), on cotton in India, *Bull. Entomol. Res.*, 99, 537-541.
- Naik V.C.B., Kumbhare S., Kranthi S., Satija U., Kranthi K.R., 2018. Field-evolved resistance of pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), to transgenic *Bacillus thuringiensis* (Bt) cotton expressing crystal 1Ac (Cry1Ac) and Cry2Ab in India, *Pest Management Science*, 74, 2544-2554.
- Najar-Rodríguez A.J., Lavidis N.A., Mensah R.K., Choy P.T., Walter G.H., 2008. The toxicological effects of petroleum spray oils on insects – Evidence for an alternative mode of action and possible new control options, *Food and Chemical Toxicology*, 46, 3003-3014.
- Nangle K.W., 2012. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) treatment of cotton on the oviposition behavior of *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), MS Thesis, Auburn University, 56 p.
- Naranjo S.E., 2001. Conservation and evaluation of natural enemies in IPM systems for *Bemisia tabaci*, *Crop Protection*, 20, 835-852.
- Naranjo S.E., Ellsworth R.G., 2009. Fifty years of the integrated control concept: moving the model and implementation forward in Arizona, *Pest Management Science*, 65, 1267-1286.
- Naranjo S.E., Ellsworth P.C., 2010. Fourteen years of Bt cotton advances IPM in Arizona, *Southwestern Entomologist*, 35, 437-444.
- Naranjo S.E., Luttrell R.G., 2009. Cotton arthropod IPM. Chapter 25, in *Integrated Pest Management, concepts, tactics, strategies and case studies*, Radcliffe E.B., Hutchison W.D., Candelado R.E. (eds.), Cambridge University Press, 324-340.
- Neves R.C. S., Colares F., Torres J.B., Santos R.L., Bastos C.S., 2014. Rational practices to manage boll weevils colonization and population growth on family farms in the Semiárido region of Brazil, *Insects*, 5, 818-831.
- Ni M., Ma W., Wang X., Gao M., Dai Y., Wei X. *et al.*, 2017. Next-generation transgenic cotton : pyramiding RNAi and Bt counters insects resistance, *Plant Biotechnology Journal*, 15, 1204-1213.
- Nibouche S., Gozé E., 1993. Efficacité et rentabilité de la protection phytosanitaire vulgarisée en culture cotonnière au Burkina Faso, *Coton et fibres tropicales*, 48, 177-193.
- Nitnavare R.B., Bhattacharya J., Singh S., Kour A., Hawkesford M.J., Arora N., 2021. Next generation dsRNA-based insect control: success so far and challenges, *Frontiers in plant science*, 12, 673576. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.673576>.
- Nóia M., Borges I., Soares A.O., 2008. Intraguild predation between the aphidophagous ladybird beetles *Harmonia axyridis* and *Coccinella undecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae), the role of intra and extraguild prey densities, *Biological Control*, 46, 140-146.
- Nyambo B.T., 1989. Use of scouting in the control of *Heliothis armigera* in cotton in WCGA in Tanzania, *Crop Protection*, 8, 310-317.
- Ochou G.O., Avicor S.W., Matthews G.A., 2021. Cotton growing in West Africa, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 185-215.
- Orr A., Ritchie J.M., 2004. Learning from failure: smallholder farming systems and IPM in Malawi, *Agricultural Systems*, 79, 31-54.
- Orsenna E., 2006. *Voyage aux pays du coton. Petit précis de mondialisation*, Fayard, 289 p.
- Ouedraogo A., Yombi L., Doumbia S., Eyhorn F., Dischl R., 2008. *Guide de production du coton biologique et équitable. Un manuel de référence pour l'Afrique de l'Ouest*, Zurich, Suisse, Helvetas (ed.), 49 p.

- Ouyang F., Men X., Yang B., Su J., Zhang Y., Zhao Z. *et al.*, 2012. Maize benefits the predatory beetle, *Propylea japonica* (Thunberg), to provide potential to enhance biological control for aphids in cotton, *PLoS ONE*, 7(9), e44379.
- Ouyang F., Su W., Zhang Y., Liu X., Su J., Zhang Q. *et al.*, 2020. Ecological control service of the predatory natural enemy and its maintaining mechanisms in rotation-intercropping ecosystem via wheat-maize-cotton, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, 107024. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107024>.
- Painter R.H., 1951. Resistance to insects in cotton, in *Insect resistance in crops plants*, Lawrence, Kansas, The University Press of Kansas, 275-325.
- PAN (Pesticide Action Network), 2005. Field guide to non-chemical pest management in cotton production, PAN Germany, Hamburg, 30 p.
- Parajulee M.N., Montandon R., Slosser J.E., 1997. Relay intercropping to enhance abundance of insect predators of cotton aphid (*Aphis gossypii* Glover) in Texas cotton, *International Journal of Pest Management*, 43(3), 227-232.
- Parajulee M.N., Shrestha R.B., Slosser J.E., Bordovsky D.G., 2011. Effects of skip-row planting pattern and planting date on dry land cotton insect pest abundance and selected plant parameters, *Southwestern Entomologist*, 36(1), 21-39.
- Parker J.E., Snyder W.E., Hamilton G.C., Rodriguez-Saona C., 2013. Companion planting and insect pest control, in *Weed and pest Control – conventional and new challenges*, Soloneski S., Larramendy M.L. (Eds.), IntechOpen, 1-29. <http://dx.doi.org/10.5772/55044>.
- Parnell F.R., King H.E., Ruston D.E., 1949. Jassid resistance and hairiness of the cotton plant, *Bulletin of Entomological Research*, 39, 539-575.
- Parsa S., Morse S., Bonifacio A., Chancellor T.C.B., Condori B., Crespo-Pérez V. *et al.*, 2014. Obstacles to integrated pest management adoption in developing countries, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 3889-3894.
- Pavela R., Murugan K., Canale A., Benelli G., 2017. *Saponaria officinalis*-synthesized silver nanocrystals as effective biopesticides and oviposition inhibitors against *Tetranychus urticae* Koch, *Industrial crops and products*, 97, 338-344.
- Pearson E.O., 1948. The development of internal boll disease of cotton in relation to time of infection, *Annals of Applied Biology*, 34, 527-545.
- Pearson E.O., Maxwell-Darling R.C., 1958. The insect pests of cotton in tropical Africa, Commonwealth Institute of Entomology, London, UK, 355 p.
- Pell J.K., Pluke R., Clark S.J., Kenward M.G., P. G. Alderson P.G., 1997. Interactions between two aphid natural enemies, the entomopathogenic fungus *Erynia neoaphidis* Remaudière, Hennebert (Zygomycetes: Entomophthorales) and the predatory beetle *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae), *Journal of invertebrate pathology*, 69, 261-268.
- Pell J.K., Baverstock J., Roy H.E., Ware R.L., Majerus M.E.N., 2008. Intraguild predation involving *Harmonia axyridis*: a review of current knowledge and future perspectives, *BioControl*, 53, 147-168.
- Peshin R., Bandral R.S., Zhang W., Wilson L., Dhawan A.K., 2009. Integrated pest management. A global overview of history, programs and adoption, in *Integrated pest management: Innovation-development process*, Peshin R., Dhawan A.K. (eds.), Springer Netherlands, 1-49.
- Peshin R., Kranthi K.R., Sharma R., 2014. Pesticide use and experiences with integrated pest management programs and Bt cotton in India, in *Integrated Pest Management*, Peshin R., Pimentel D. (eds), Springer Science, 269-306.
- Phoofolo M., Giles K.L., Elliott N.C., 2010. Effects of relay-intercropping sorghum with winter wheat, alfalfa, and cotton on lady beetle (Coleoptera: Coccinellidae) abundance and species composition, *Environ. Entomol.*, 39(3), 763-774.

- Pickett C.H., Rodriguez R., Brown J., Coutinot D., Hoelmer K.A., Kuhlmann U. *et al.*, 2007. Establishment of *Peristenus digoneutis* and *P. relictus* (Hymenoptera: Braconidae) in California for the control of *Lygus* spp. (Heteroptera: Miridae), *Biocontrol Science and Technology*, 17(3), 261-272.
- Pierrard G., 1970. *Tibiomus bebedjaensis* n. sp. (Odontopygidae) myriapode nuisible à la culture du cotonnier au Tchad, *Coton et fibres tropicales*, 25, 355-357.
- Pineda A., Zheng S.-J., van Loon J.J.A., Pieterse C.M.J., Dicke M., 2010. Helping plants to deal with insects: the role of beneficial soil-borne microbes, *Trends Plant Sci.*, 15, 507-514.
- Pogue M.G., 2013. Revised status of *Chloridea* Duncan and (Westwood), 1841, for the *Heliothis virescens* species group (Lepidoptera: Noctuidae: Heliiothinae) based on morphology and three genes, *Systematic entomology*, 38, 523-542.
- Pomeroy A.W.J., 1925. The cotton boll worms of Southern Nigeria, *Ann. Bull. Agric. Dept. Nigeria*, 4, 89-108.
- Poutouli W., Silvie P., Aberlenc H.P., 2011. *Hétéroptères phytophages et prédateurs d'Afrique de l'Ouest. Phytophagous and predatory Heteroptera in West Africa*, Versailles, éditions Quæ, 96 p.
- Prasad Y.G., 2022. Management strategy against pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) in Bt cotton – what next?, in *Book of papers of the World Cotton Research Conference-7*, Cairo, Egypt, October 4-7, 707-713.
- Prasifka J.R., Krauter P.C., Heinz K.M., Sansone C.G., Minzenmayer R.R., 1999. Predator conservation in cotton: using grain sorghum as a source for insect predators, *Biological Control*, 16, 223-229.
- Prasifka J.R., Heinz K.M., Minzenmayer R.R., 2004a. Relationships of landscape, prey and agronomic variables in the abundance of generalist predators in cotton (*Gossypium hirsutum*) fields, *Landscape ecology*, 19, 709-717.
- Prasifka J.R., Heinz K.M., Sansone C.G., 2004b. Timing, magnitude, rates, and putative causes of predator movement between cotton and grain sorghum fields, *Environmental entomology*, 33(2), 282-290.
- Pretty J., 2018. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems, *Science*, 362, eaav0294.
- Pretty J., Bharucha Z.P., 2015. Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa, *Insects*, 6, 152-182.
- Pretty J., Benton T.G., Bharucha Z.P., Dicks L.V., Flora C.B., Godfray H.C.J. *et al.*, 2018. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification, *Nat. Sustain.*, 1, 441-443.
- Price D.R.G., Gatehouse J.A., 2008. RNAi-mediated crop protection against insects, *Trends in biotechnology*, 26(7), 393-400.
- Prudent P., 1988. Étude bio-écologique d'*Eutinobothrus brasiliensis* (Hambl.) (Coleoptera : Curculionidae), foreur de tige du cotonnier au Paraguay, thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse, France, 879 p.
- Prudent P., Loko S., Deybe D., Vaissayre M., 2006. Factors limiting the adoption of IPM practices by cotton farmers in Benin: a participatory approach, *Experimental Agriculture*, 43, 113-124.
- Pupim Junior O., Schuster I., Barth Pinto R.J., Bélot J.L., Silvie P., Gonzaga Chitarra L. *et al.*, 2008. Inheritance of resistance to cotton blue disease, *Pesquisa agropecuária brasileira*, 43(5), 661-665.
- Pyke B., Rice M., Sabine B., Zalucki M., 1987. The push-pull strategy. Behavioural control of *Heliothis*, *The Australian Cotton Grower*, 9, 7-9.
- Ramallo F.S., 1994. Cotton pest management, *Annual Review of Entomology*, 39, 563-578.
- Rathore K.S., Sundaram S., Sunilkumar G., Campbell L.M., Puckhaber L., Marcel S. *et al.*, 2012. Ultra-low gossypol cottonseed: generational stability of the seed-specific, RNAi-mediated phenotype and resumption of terpenoid profile following seed germination, *Plant Biotechnology Journal*, 10, 174-183.

- Rathore K.S., Pandeya D., Campbell L.M., Wedegaertner L.P., Stipanovic R.D., Thenell J.S. *et al.*, 2020. Ultra-low gossypol cottonseed: selective gene silencing opens up a vast resource of plant-based protein to improve human nutrition, *Critical reviews in plant science*, 39(1), 1-29.
- Ratnadass A., Zakari-Moussa O., Kadi-Kadi H.A., Kumar S., Grechi I., Ryckewaert P. *et al.*, 2014. Potential of pigeon pea as a trap crop for control of fruit worm infestation and damage to okra, *Agricultural and forest entomology*, 16(4), 426-433. <https://doi.org/10.1111/afe.12072>.
- Renou A., Brévault, T., 2016. Ravageurs et maladies du cotonnier, et gestion intégrée des ravageurs, in Crétenet M., Gourlot J.-P. (coord.), *Le Cotonnier*, Versailles, éditions Quæ, 109-154.
- Renou A., Martin T., Gopaye I., 1993. Parcelles à trois niveaux de protection en culture cotonnière au Tchad. Résultats sur trente ans, *Coton et fibres tropicales*, 48, 121-137.
- Renou A., Téréta I., Togola M., 2011. Manual topping decreases bollworm infestations in Mali, *Crop Protection*, 30, 1370-1375.
- Renou A., Téréta I., Togola M., Brévault T., 2012. First steps towards « green » cotton in Mali. 2012, *Outlooks on Pest Management*, 173-176.
- Reteau A., 2016. Regard critique d'un historien des sciences sur l'évolution de la protection des cultures, in Deguine J.-P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.-N. (coord.), *Protection agroécologique des cultures*, Versailles, éditions Quæ, 41-47.
- Reynolds H.T., Adkisson P.L., Smith R.F., 1975. Cotton insect pest management, in R. Metcalf, W.H. Luckmann (eds.), *Introduction to insect pest management*, New York, J. Wiley, Sons, 379-443.
- Ribeiro T.P., Arraes F.B.M., Lourenço-Tessutti I.T., Silva M.S., Lisei-de-Sá M.E., Lucena W.A. *et al.*, 2017. Transgenic cotton expressing Cry10Aa toxin confers high resistance to the cotton boll weevil, *Plant Biotechnology Journal*, 15, 997-1009.
- Rios D.A.M., Specht A., Roque-Specht V.F., Sosa-Gomez D.R., Fochezato J., Malaquias J.V. *et al.*, 2021. *Helicoverpa armigera* and *Helicoverpa zea* hybridization: constraints, heterosis, and implications for pest management, *Pest Manag. Sci.*, 78, 955-964.
- Ripper W.E., George L., 1965. *Cotton pests of The Sudan*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 345 p.
- Ris N., Borowiec N., Bout A., Debellé F., Fellous S., Le Ralec A. *et al.*, 2022. Biocontrôle et macro-organismes : panorama. De la lutte biologique par acclimatation à la technique de l'insecte incompatible, les stratégies de biocontrôle faisant appel aux macro-organismes se diversifient, *Phytoma*, 76, 14-18.
- Rosenheim J.A., Wilhoit L.R., 1993. Predators that eat other predators disrupt cotton aphid control, *California Agriculture*, 47(5), 7-9.
- Rosenheim J.A., Wilhoit L.R., Armer C.A., 1993. Influence of intraguild predation among generalist insect predators on the suppression of an herbivore population, *Oecologia*, 96, 439-449.
- Saad M.M.G., Ghareeb R.Y., Saeed A.A., 2019. The potential of endophytic fungi as bio-control agents against the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis* (Boisd.) (Lepidoptera: Noctuidae), *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 29, 7. <https://doi.org/10.1186/s41938-019-0108-x>.
- Saldamando C.I., Vélez-Arango A.M., 2010. Host plant association and genetic differentiation of Corn and Rice strains of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) in Colombia, *Neotropical Entomology*, 39(6), 921-929.
- Sankaranarayanan K., Nalayini P., Sabesh M., Rajendran K., Nachane R.P., Gopalakrishnan N., 2011. Multi-tier cropping system for profitability and stability in Bt cotton production, *Technical Bulletin*, 2/2011, 19 p.
- Santos-Amaya O.F., Tavares C.S., Pereira E.J.G., 2024. Shared genetic basis of resistance to Cry1F protein in three independent Brazilian strains of fall armyworm, *Crop Protection*, 175, 106442. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106442>.

- Schader C., Zaller J.G., Köpke U., 2005. Cotton-basil intercropping: effects on pests, yields and economical parameters in an organic field in Fayoum, Egypt, *Biological Agriculture and Horticulture*, 23, 59-72.
- Schellhorn A., Bianchi F.J.J.A., Hsu C.L., 2014. Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: links to pest suppression, *Annual Review of Entomology*, 59, 559-581.
- Schellhorn N.A., Parry H.R., Macfadyen S., Wang Y., Zalucki M.P., 2015. Connecting scales: achieving in-field pest control from areawide and landscape ecology studies, *Insect Science*, 22, 35-51.
- Schreefel L., Schulte R.P.O., de Boer I.J.M., Pas Schrijver A., van Zanten H.H.E., 2020. Regenerative agriculture – the soil is the base, *Global Food Security*, 26, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.
- Scott J.G., Michel K., Bartholomay L.C., Siegfried B.D., Hunter W.B., Smaghe G. *et al.*, 2013. Towards the elements of successful insect RNAi, *Journal of Insect Physiology*, 59, 1212-1221.
- Sekamatte M.B., Heneidy A.H., 1997. Control action thresholds for bollworm management in Uganda, *African Crop Science Conference Proceedings*, 3, 1167-1171.
- Sevacherian V., Stern V.M., 1974. Host plant preferences of *Lygus* bugs in alfalfa-inter-planted cotton fields, *Environmental Entomology*, 3, 761-766.
- Sezen K., Aydin E.G., Yildiz H.S., Yildiz I., Can F., Ghanbari S. *et al.*, 2024. First record of the genus *Haritalodes* Warren, 1890 and *H. derogata* (Fabricius, 1775) (Lepidoptera: Crambidae: Spilome-lineae) from Türkiye and its morphological and molecular identification, *Zootaxa*, 5447(1), 124-132.
- Sharman M., Smith T., Webb M., Filardo F., Grundy P., Wilson L., 2021. Host range and genetic diversity of two polerovirus species associated with cotton bunchy top disease, *Australasian Plant Pathology*, 51, 221-230. <https://doi.org/10.1007/s13313-021-00829-6>.
- Shrinivas, Sreenivas A.G., Hanchinal S.G., Hurali S., Beldhadi R.V., 2019. Dissipation of pheromone from dispensers of specialized pheromone and Lure Application Technology (SPLAT-PBW) formulation used against pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) in *Bt* cotton ecosystem, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 8(2), 2336-2346.
- Shukla J.N., Kasli M., Sethi A., Narva K.E., Fishilevich E., Singh S. *et al.*, 2016. Reduced stability and intracellular transport of dsRNA contribute to poor RNAi response in lepidopteran insects, *RNA Biology*, 13(7), 656-669.
- Silva C.A.D., Ramalho F.S., 2013. Kaolin spraying protects cotton plants against damages by boll weevil *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera : Curculionidae), *J. Pest. Sci.*, 86, 563-569.
- Silvie P., 1990a. *Syllepte derogata* (Fabricius, 1775) (Lepidoptera, Pyraloidea, Crambidae, Spilome-lineae), *Coton et fibres tropicales*, 45(3), 199-227.
- Silvie P., 1990b. *Mussidia nigrivenella* Ragonot (Pyralidae, Phycitinae), un ravageur mal connu du cotonnier, *Coton et fibres tropicales*, 45, 323-333.
- Silvie P., 1991a. Dynamiques annuelles des chenilles déprédatrices des organes florifères et fructifères du cotonnier au Tchad, *Coton et fibres tropicales*, 46(3), 185-205.
- Silvie P., 1991b. Effet du parasitisme naturel observé au Tchad chez deux lépidoptères phyllophages du cotonnier : *Syllepte derogata* (Crambidae) et *Cosmophila flava* (Noctuidae), *Entomophaga*, 36(3), 431-441.
- Silvie P., 1993. Nouvelles données sur *Mussidia nigrivenella* Ragonot (Lepidoptera, Pyralidae) au Togo, *Insect science and its application*, 14(5/6), 643-649.
- Silvie P., 2022. Plant-based extracts for cotton pest management in Sub-Saharan Africa: a review, *Botany letters*, 170(1), 28-41. <https://doi.org/10.1080/23818107.2022.2122556>.
- Silvie P., Gozé E., 1991. Estimation des pertes de production dues aux ravageurs du cotonnier au Tchad, *Coton et fibres tropicales*, 46, 15-32.
- Silvie P., Papierok B., 1991. Les ennemis naturels d'insectes du cotonnier au Tchad : premières données sur les champignons de l'ordre des Entomophthorales, *Coton et fibres tropicales*, 46, 293-308.

- Silvie P., Sognigbe B., 1993. Use of action thresholds on cotton in northern Togo, *International Journal of Pest Management*, 39, 51-56.
- Silvie P., Delvare G., Males J.-M., 1989. Arthropodes associés à la culture cotonnière au Tchad, ravageurs, prédateurs et parasites, *Coton et fibres tropicales*, 44(4), 275-290.
- Silvie P., Delvare G., Aberlenc H.-P., Sognigbe B., 1993a. Contribution à l'inventaire faunistique du cotonnier au Togo dans une optique de lutte intégrée, *Coton et fibres tropicales*, 48, 313-325.
- Silvie P., Le Gall P., Sognigbe B., 1993b. Evaluation of a virus-insecticide combination for cotton pest control in Togo, *Crop Protection*, 12, 591-596.
- Silvie P., Deguine J.-P., Nibouche S., Michel B., Vaissayre M., 2000. Procedures, advantages and constraints of staggered targeted control programmes on cotton in West Africa, in Gillham Fred M. (ed.), *New frontiers in cotton research: Proceedings of the World Cotton Research Conference-2*, Athens, Greece, September 6-12, 1998, Washington, ICAC, 829-832.
- Silvie P., Deguine J.-P., Nibouche S., Michel B., Vaissayre M., 2001. Potential of threshold-based interventions for cotton pest control by small farmers in West Africa, *Crop Protection*, 20, 297-301.
- Silvie P., Renou A., Badji C.A., 2006. Controle das pragas do algodão por práticas culturais e manipulação do habitat, *Revista Brasileira de oleaginosas e fibrosas*, 10, 1183-1196.
- Silvie P., Bélot J.-L., Michel B., 2007. Manual de identificação das pragas e seus danos no cultivo do algodão, Cascavel-PR, Brasil, Coodetec, Agrolab, Cirad, Boletim Técnico 34, 120 p.
- Silvie P., Leroy T., Michel B., Bournier J.P., 2009. Manual de identificação dos inimigos naturais no cultivo do algodão, Cascavel-PR, Brasil, Coodetec, Agrolab, Cirad, Boletim Técnico, 35, 76 p.
- Silvie P., Martin J., Debru J., Vaissayre M., 2010. Le coton biologique au Paraguay. 2. Production et contraintes agronomiques, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 14, 311-320.
- Silvie P.J., Adegnikia M.A., Akantetou K.P., Ayeva B., Bonni G., Brevault T. *et al.*, 2011. Cotton pest management programmes using threshold-based interventions developed by Cirad and its partners in sub-Saharan African countries, *Proceedings of the World Cotton Research Conference-5*, Mumbai, India, 7-11 November 2011, Kranthi *et al.* (Eds), 244-254.
- Silvie P., Renou A., Vodounnon S., Bonni G., Adegnikia M.O., Héma O. *et al.*, 2013a. Threshold-based interventions for cotton pest control in West Africa: what's up 10 years later?, *Crop Protection*, 43, 157-165.
- Silvie P., Thomazoni D., Soria, M.F., Saran, P.E., Bélot, J.-L., 2013b. Pragas e seus danos em algodoeiro, Cascavel-PR: Igol, 184 p.
- Silvie P., Delvare G., Aberlenc H.-P., Prudent P., Gil-Santana H., Gomez V. *et al.*, 2014. Diversité des arthropodes rencontrés en culture cotonnière au Paraguay. 2. Insectes prédateurs, parasitoïdes et hyperparasitoïdes, *Faunistic entomology*, 67, 179-190.
- Silvie P., Aberlenc H.-P., Delvare G., 2023a. Prédateurs des pucerons *Aphis gossypii* Glover et leurs parasitoïdes en Afrique au sud du Sahara : éléments d'identification (et coccinelles phytophages), Montpellier, Cirad-IRD, 21 p.
- Silvie P., Lopez Llandres A., Yarou B.B., De Troij A., Goergen G., 2023b. An entomopathogenic fungus recently discovered to attack *Amrasca biguttula biguttula* (Hem.: Cicadellidae) in Benin: provisional identification and research to be undertaken, *Cotton Innovations*, 3(10), 15-19.
- Simmons G.S., Alphey L., Vasquez T., Morrison N.I., Epton M.J., Miller E. *et al.*, 2007. Potential use of a conditional lethal transgenic pink bollworm *Pectinophora gossypiella* in area-wide eradication or suppression programmes, in *Area-wide control of insects pests: from research to field implementation*, Vreysen M.J.B., Robinson A.S., Hendrichs J. (eds), 119-123.
- Simmons G.S., McKemey A.R., Morrison N.I., O'Connell S., Tabashnik B.E., Claus J. *et al.*, 2011. Field performance of a genetically engineered strain of pink bollworm, *PLoS ONE*, 6(9), e24110. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024110>.

- Singh S., Gupta M., Pandher S., Kaur G., Rathore P., Palli S.R., 2018. Selection of housekeeping genes and demonstration of RNAi in cotton leafhopper, *Amrasca biguttula biguttula* (Ishida), *PLoS ONE*, 13(1), e0191116. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191116>.
- Singh S., Pandher S., Kumar H., Kumar A., 2022. Comparative RNAi efficiency in cotton sap feeders through DSRNA mediated gene knockdown, *Book of papers of the World Cotton Research Conferences-7*, 4-7 October 2022, Cairo, Egypt, 467-472.
- Sirinathsinghji E., Klein K., Perls D., 2020. Pesticides inhibiteurs de gènes. Risques et inquiétudes, *Les Amis de la Terre, États-Unis*, rapport, 33 p.
- Smith J.W., 1998. Boll weevil eradication: area-wide pest management, *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 91(3), 239-247.
- Smith H.S., Armitage H.M., 1931. The biological control of mealybugs attacking citrus, *Calif. Agr. Exp. Sta. Bull.*, 509, 74 p.
- Smith H.S., Compere H., 1931. Introduced parasites successfully control the citrophilus mealybug, *J. Econ. Entomol.*, 24, 942-945.
- Soni N., Dhiman R.C., 2022. Green silver nanoparticles against *Helicoverpa armigera* and its effects on biochemical, morphological and histological aspects, *Journal of entomology and zoology studies*, 10(5), 284-292.
- Soto R.L., Padilla M.C., de Vente J., 2020. Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impacts of regenerative agriculture on ecosystem services, *Ecosystems Services*, 45, 101157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101157>.
- Sreenivas A.G., Markandeya G., Hanchinal S.G., Sashidar B., Badariprasad P.R., Arunkumar H. et al., 2022. Controlled release emission mating interruption technique (CREMIT), a novel and viable approach for area-wide management of pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) in Bt cotton ecosystem, in *Book of papers of the World Cotton Research Conference-7*, Cairo, Egypt, October 4-7, 2022, 714-719.
- Sripontan Y., Tan C.-W., Hung M.-H., Young C.-C., Hwang S.-Y., 2014. Effects of plant-growth-promoting micro-organisms and fertilizers on growth of cabbage and tomato and *Spodoptera litura* performance, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 17, 587-589.
- Steinkraus D.C., Slaymaker P.H., 1994. Effect of temperature and humidity on formation, germination, and infectivity of conidia of *Neozygites fresenii* (Zygomycetes: Neozygitaceae) from *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), *J. Invertebr. Pathol.*, 64, 130-137.
- Steinkraus D.C., Boys G.O., 2005. Mass harvesting of the entomopathogenic fungus, *Neozygites fresenii*, from natural fields epizootics in the cotton aphid, *Aphis gossypii*, *J. Invert. Pathol.*, 88, 212-217.
- Steinkraus D.C., Kring, T.J., Tugwell, N.P., 1991. *Neozygites fresenii* in *Aphis gossypii* on cotton, *Southwest Entomol.*, 16, 118-122.
- Steinkraus D.C., Boys G.O., Slaymaker, P.H., 1993. Culture, storage, and incubation period of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae) a pathogen of the cotton aphid, *Southwest Entomol.*, 18, 197-202.
- Steinkraus D.C., Hollingsworth R.G., Slaymaker P.H., 1995. Prevalence of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae) on cotton aphids (Homoptera: Aphididae) in Arkansas cotton, *Environ. Entomol.*, 24, 465-474.
- Steinkraus D.C., Hollingsworth R.G., Boys G.O., 1996. Aerial spores of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae), density, periodicity, and potential role in cotton aphid (Homoptera: Aphididae) epizootics, *Environ. Entomol.*, 25, 48-57.
- Steinkraus D.C., Howard M.N., Hollingsworth R.G., Boys G.O., 1999. Infection of sentinel cotton aphids (Homoptera: Aphididae) by aerial conidia of *Neozygites fresenii* (Entomophthorales: Neozygitaceae), *Biological Control*, 14, 181-185.

- Stenberg J.A., 2017. A conceptual framework for integrated pest management, *Trends in plant science*, 22(9), 759-769.
- Sterling W.L., 1984. Action and inaction levels in pest management, Texas Agricultural Experiment Station, Bulletin B-1480, 24 p.
- Sterling W.L., Hartstack A. W., Dean D.A., 1996. Towards comprehensive economic thresholds for crop management, in *Cotton insects and mites: Characterization and management*, Memphis, Tennessee, King E.G., Phillips J.R., Coleman R.J. (eds), 251-282.
- Stern V.M., Smith R.F., van den Bosch R., Hagen K.S., 1959. The integrated control concept, *Hilgardia*, 29(2), 81-99.
- Stern V.M., van Den Bosch R., Leigh T.F., 1964. Strip cutting alfalfa for *Lygus* bug control, *California Agriculture*, 4-6.
- Stern V.M., van Den Bosch R., Leigh T.F., McCutcheon O.D., Sallee W.R., Houston C.E. et al., 1967. *Lygus* control by strip cutting alfalfa, *Agric. Ext. Serv. Bull. Univ. Calif.*, AXT-241.
- Stern V.M., Mueller A., Sevacherian V., Way M., 1969. *Lygus* bug control in cotton through alfalfa interplanting, *California Agriculture*, 8-10.
- Storer N.P., Kubiszak M.E., Ed King J., Thompson G.D., Santos A.C., 2012. Status of resistance to Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: lessons from Puerto Rico, *Journal of invertebrate pathology*, 110, 294-300.
- Streito J.-C., Nibouche S., 1997. First observations on the parasitoids associated with lepidopterous pests of cotton in Burkina Faso, *Entomophaga*, 42(4), 543-557.
- Streito J.-C., Nibouche S., 1998. Biologie et écologie de *Syagrus calcaratus* (F.) (Coleoptera, Chrysomelidae), ravageur de la culture cotonnière au Burkina Faso, *Bulletin de la Société entomologique de France*, 103(1), 51-56.
- Stride G.O., 1969. Investigations into the use of a trap crop to protect cotton from attack by *Lygus vosseleri* (Heteroptera: Miridae), *J. ent. Soc. sth. Afr.*, 32(2), 469-477.
- Sugonyaev E.S., 1994. Cotton pest management, *Annual Review of Entomology*, 39, 579-592.
- Sumber J., Giller K.E., 2022. What is 'conventional' agriculture?, *Global Food Security*, 32, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100617>.
- Sunilkumar G., Campbell L.M., Puckhaber L., Stipanovic R.D., Rathore K.S., 2006. Engineering cottonseed for use in human nutrition by tissue-specific reduction of toxic gossypol, *PNAS*, 103(48), 18054-18059.
- Swezey S.L., Daxl R.G., 1988. Area-wide suppression of boll weevil (Coleoptera: Curculionidae) populations in Nicaragua, *Crop Protection*, 7, 168-176.
- Swezey S.L., Goldman P., Bryer J., Nieto D., 2007. Six-year comparison between organic, IPM and conventional cotton production systems in the Northern San Joaquin Valley, California, *Renewable agriculture and food systems*, 22(1), 30-40.
- Swezey S.L., Goldman P., Jergens R., Vargas R., 1999. Preliminary studies show yield and quality potential of organic cotton, *California Agriculture*, 53(4), 9-16.
- Tabashnik B.E., 2015. ABCs of insect resistance to Bt, *PLoS Genetics*, 11(11), e1005646. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005646>.
- Tabashnik B.E., Brévault T., Carrière Y., 2013. Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres, *Nature biotechnology*, 31(6), 510-521.
- Tabashnik B.E., Wu K., Wu Y., 2012. Early detection of field-evolved resistance to Bt in China: cotton bollworm and pink bollworm, *Journal of Invertebrate Pathology*, 110, 301-306.
- Tabashnik B.E., Mota-Sanchez D., Whalon M.E., Hollingworth R.M., Carrière Y., 2014. Defining terms for proactive management of resistance to Bt crops and pesticides, *J. Econ. Entomol.*, 107(2), 496-507.

- Tabashnik B.E., Liesner L.R., Ellsworth P.C., Unnithan G.C., Fabrick J.A., Naranjo S.E. *et al.*, 2021. Transgenic cotton and sterile insect releases synergize eradication of pink bollworm a century after it invaded the United States, *PNAS*, 118(1), 1-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019115118>.
- Tabib F.A.I., Karim A., Haque M.M., 2014. Effect of planting pattern on the productivity of cotton mungbean intercropping system, *Proceedings of the 6th meeting of the Asian Cotton Research and Development Network (ACRDN)*, Dhaka, Bangladesh, June 18-20, 27-28.
- Tamò M., Glitho I., Tapa-Yotto G., Muniappan R., 2022. How does IPM 3.0 look like (and why do we need it in Africa)?, *Current opinion in insect science*, 53, 100961.
- Tang R., Li S., Liang J., Yi H., Jing X., Liu T.-X., 2022. Optimization of the application of the CRISPR/Cas9 system in *Mythimna separata*, *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 170, 593-602.
- Tarazi R., Jimenez J.L.S., Vaslin M.F.S., 2020. Biotechnological solutions for major cotton (*Gossypium hirsutum*) pathogens and pests, *Biotechnology Research and Innovation*, 3, 19-26.
- Tay W.T., Soria M., Walsh T., Thomazoni D., Silvie P., Behere G. *et al.*, 2013. A brave new world for an Old World pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil, *PLoS ONE*, 8(11), e80134. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080134>.
- Tay W.T., Meagher Jr. R.L., Czapak C., Groot A.T., 2023. *Spodoptera frugiperda*: ecology, evolution, and management options of an invasive species, *Annual Review of Entomology*, 68, 299-317.
- Terenius O., Papanicolaou A., Garbutt J.S., Eleftherianos I., Huvenne H., Kanginakudru S. *et al.*, 2011. RNA interference in Lepidoptera: an overview of successful and unsuccessful studies and implications for experimental design, *Journal of Insect Physiology*, 57, 231-245.
- Textile Exchange, 2021. Organic cotton, Market Report 2021, 87 p.
- Tian H., Peng H., Yao Q., Chen H., Xie Q., Tang B. *et al.*, 2009. Developmental control of a Lepidopteran pest *Spodoptera exigua* by ingestion of bacteria expressing dsRNA of a non-midgut gene, *PLoS ONE*, 4(7), e6225.
- Tillman P.G., 2014. Physical barriers for suppression of movement of adult stink bugs into cotton, *J. Pest. Sci.*, 87, 419-427.
- Tillman G., Schomberg H., Phatak S., Mullinix B., Lachnicht S., Timper P. *et al.*, 2004. Influence of cover crops on insect pests and predators in conservation tillage cotton, *J. Econ. Entomol.*, 97(4), 1217-1232.
- Tillman P.G., Khirman A., Cottrell T.E., Lou X., Mizell R.F., Johnson C.J., 2015. Trap cropping systems and a physical barrier for suppression of stink bugs (Hemiptera: Pentatomidae) in cotton, *J. Econ. Entomol.*, 108(5), 2324-2334.
- Tittonell P., El Mujtar V., Felix G., Kebede Y., Laborda L., Soto R.L. *et al.*, 2022. Regenerative agriculture – agroecology without politics?, *Frontiers in sustainable food systems*, 6, 844261. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.844261>.
- Tonle F.B.N., Niassy S., Ndjaji M.M.Z., Tchendji M.T., Nzeukou A., Muderreri B.T. *et al.*, 2024. A road map for developing novel decision support system (DSS) for disseminating integrated pest management (IPM) technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 217: 108526. <https://doi.org/10.1016/J.compag.2023.108526>.
- Torres J.B., Bueno A. de F., 2018. Conservation biological control using selective insecticides – A valuable tool for IPM, *Biological Control*, 126, 53-64.
- Tourneux H., 2006. La communication technique en langues africaines : l'exemple de la lutte contre les ravageurs du cotonnier (Burkina Faso/Cameroun), Paris, Karthala, 157 p.
- Tsafack N., Menozzi P., Brevault T., Soti V., Deconchat M., Ouin A., 2013. Effects of landscape context and agricultural practices on the abundance of cotton bollworm *Helicoverpa armigera* in cotton fields: a case study in northern Benin, *International Journal of Pest Management*, 59(4), 294-302.

- Tuong-Vi C., Palaï O., Gawrysiak Tsafack M.N., Alignier A., Head G.P., Kim J.H., Goulard M., Menozzi P. *et al.*, 2015. Landscape effects on the abundance and larval diet of the polyphagous pest *Helicoverpa armigera* in cotton fields in North Benin, *Pest Management Science*, 72(8), 1613-1626.
- Tuong-Vi C., Palaï O., Gawrysiak G., Klassou C., Hau B., 2011. Short-season cotton (*Gossypium hirsutum*) may be a suitable response to late planting in sub-Saharan regions, *Field Crops Research*, 120, 9-20.
- Uddin F., Mortuza G.G., 2015. Sustainable cotton production at agroforestry systems in Bangladesh, *Research Review 2014-15 and programme planning 2015-16 on agroforestry research activities in Bangladesh*, 1-6.
- Udikeri S., Kranthi S., Kranthi K.R., Vandal N., Hallad A., Patil S.B. *et al.*, 2011. Species diversity, pestiferous nature, bionomics and management of mirid bugs and flower bud maggots: the new key pests of Bt cottons, *Proceedings of the World Cotton Research Conference-5*, Mumbai, India, 203-209.
- University of California, 2015. UC IPM Pest Management Guide: Cotton, UC ANR Publication 3444, UC Statewide IPM program, University of California (Eds.), Davis, USA, 108 p.
- Vaissayre M., 1977. Contribution à la connaissance du complexe entomophage en culture cotonnière dans le sud-ouest de Madagascar, *Coton et fibres tropicales*, 32(1), 35-38.
- Vaissayre M., Cauquil J., 2000. *Main pests and diseases of cotton in Sub-Saharan Africa*, éditions Cirad-CTA, 60 p.
- Van den Berg H., Cock M.J.W., 1993. African bollworm and its natural enemies in Kenya, CAN International, Wallingford, UK, 51 p.
- Van den Berg, H., Waage, J.K., Cock, M.J.W., 1988. Natural enemies of *Helicoverpa armigera* in Africa- a review, Ascot Berks, UK, C.A.B. International Institute of Biological Control, 81 p.
- Van Huis A., 2009. Challenges of integrated pest management in sub-Saharan Africa, in *Integrated pest management: Dissemination and impact*, Peshin R., Dhawan A.K. (eds.), Springer, Netherlands, 395-417.
- Van Huis A., Meerman F., 1997. Can we make IPM work for resource-poor farmers in sub-Saharan Africa?, *International Journal of Pest Management*, 43(4), 313-320.
- Van Oosten V.R., Bodenhausen N., Reymond P., van Pelt J.A., van Loon L.C., Dicke M. *et al.*, 2008. Differential effectiveness of microbially induced resistance against herbivorous insects in *Arabidopsis*, *Mol. Plant Microbe Interact.*, 21, 919-930.
- Van Rensburg J.B.J., 2007. First report of field resistance by the stem borer, *Busseola fusca* (Fuller) to Bt-transgenic maize, *S. Afr. J. Plant Soil*, 24(3), 147-151.
- Vargas G., Rivera-Pedroza L.F., Garcia L.F., Jahnke S.M., 2023. Conservation biological control as an important tool in the Neotropical region, *Neotropical Entomology*, 52, 134-151.
- Vayssière P., Mimeur J., 1925. *Les Myriapodes et les Hémiptères nuisibles au cotonnier en A.O.F.*, extrait de l'Agronomie coloniale, bulletin mensuel de l'Institut national d'agronomie coloniale, Paris, librairie Émile Larose, n° 91, 25 p.
- Vayssière P., Mimeur J., 1926. *Les insectes nuisibles au cotonnier en Afrique Occidentale Française*, Paris, lib. Émile Larose, 175 p.
- Verhulst N., Govaerts B., Verachtert E., Castellanos-Navarrete A., Mezzalama M., Wall P. *et al.*, 2010. Conservation Agriculture, Improving Soil Quality for Sustainable Production Systems?, in La R., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*, USA, 137-208.
- Vijayasamundeeswari A., Ladhakshmi D., Sankaralingan A., Samiyappan R., 2009. Plant growth promoting rhizobacteria of cotton affecting the developmental stages of *Helicoverpa armigera*, *Journal of plant protection research*, 49, 239-243.
- Vodounnon S., Silvie P., Gozé E., 1996. Risques liés à la prise de décision pour la protection du cotonnier sur seuil d'intervention, *Medelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit Gent*, 61(3B), 975-986.

- Vognan G., Fok M., 2019. Performance différenciée du coton Bt en début de diffusion : cas du Burkina Faso, *Cahiers Agricultures*, 28, 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019026>.
- Vreeland Jr. J.M., 1999. The revival of colored cotton, *Scientific American*, 280(4), 112-118.
- Waghmare V.N., Venugopalan M.V., Nagrare V.S., Gawande S.P., Nagrale D.T., 2021. Cotton growing in India, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 30-52.
- Wakelyn P. J., Chaudhry R. (eds.), 2010. *Cotton: technology for the 21st century*, 475 p.
- Walters M., Staten R., Roberson R., 2000. Pink bollworm integrated management using sterile insects under field trial conditions, in *Area-wide control of fruit flies and other insect pests*, Keng-Hong Tan (ed.), Imperial Valley, California, 201-206.
- Wamiq G., Khan J.A., 2018. Overexpression of ghr-miR166b generates resistance against *Bemisia tabaci* infestation in *Gossypium hirsutum* plants, *Planta*, 247, 1175-1189.
- Wan P., Wu K., Huang M., Yu D., Wu J., 2008. Population dynamics of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) on Bt cotton in the Yangze River Valley of China, *Environ. Entomol.*, 37(4), 1043-1048.
- Wan P., Huang Y., Wu H., Huang M., Cong S., Tabashnik B.E. *et al.*, 2012. Increased frequency of pink bollworm resistance to Bt toxin Cry1Ac in China, *PLoS ONE*, 7(1), e29975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029975>.
- Wang G., Fok M., 2016. Are women less capable in managing crops? Insights from cotton production in Northern China, *Feminist Economics*, 23(4), 117-142. <https://doi.org/10.1080/13545701.2016.1241416>.
- Wang S., Just D.R., Pinstrup-Andersen P., 2008. Bt-cotton and secondary pests, *Ind. J. Biotechnology*, 10(2/3), 113-121.
- Weinberg J., Ota N., Goergen G., Fagbohoun J.R., Tapa-Yotto G.T., Kriticos D.J., 2022. *Spodoptera eridania*: Current and emerging crop threats from another invasive, pesticide-resistant moth, *Entomologia generalis*, 42(5), 701-712.
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement or a practice. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503-515.
- Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A., Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 1-20.
- Wezel A., Herren B.G., Kerr R.B., Barrios E., Gonçalves A.L.R., Sinclair F., 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 40. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>.
- Whitehouse M.E.A., 2011. IPM of mirids in Australian cotton: why and when pest managers spray for mirids, *Agricultural Systems*, 104, 30-41.
- Willcocks F.C., Bahgat S., 1937. *The insect and related pests of Egypt: Insects and mites injurious to the cotton plant*, Volume 1, Part 2. Royal Agricultural Society, Le Caire, 792 p.
- Williamson S., Mensah R., 2016. The food spray manual. Using the food spray method to enhance biological control in cotton, A trainers' guide, Pesticide Action Network (Ed.), United Kingdom, 188 p.
- Wilson L., Downes S., Khan M., Whitehouse M., Baker G., Grundy P. *et al.*, 2013. IPM in the transgenic era: a review of the challenges from emerging pests in Australian cotton systems, *Crop, Pasture Science*, 64(8), 737-749. <http://dx.doi.org/10.1071/CP13070>.
- Wilson L.J., Whitehouse M.E.A., Herron G.A., 2018. The management of insect pests in Australian cotton: an evolving story, *Annual Review of Entomology*, 63, 215-237.
- Wu K.M., 2007. Regional management strategy for cotton bollworm *Helicoverpa armigera* in China, in *Area-wide control of insects pests: from research to field implementation*, Vreysen M.J.B., Robinson A.S., Hendrichs J. (eds). 559-565.

- Wu K.M., Guo Y.T., 2005. The evolution of cotton pest management practices in China, *Annual Review of Entomology*, 50, 31-52.
- Wu K., Li W., Feng H., Guo Y., 2002. Seasonal abundance of the mirids, *Lygus lucorum* and *Adelphocoris* spp. (Hemiptera: Miridae) on Bt cotton in northern China, *Crop protection*, 21, 997-1002.
- Wu K., Shirk P.D., Taylor C.E., Furlong R.B., Shirk B.D., Pinheiro D.H. *et al.*, 2018. CRISPR/Cas9 mediated knockout of the *abdominal-A* homeotic gene in fall armyworm moth (*Spodoptera frugiperda*), *PLoS ONE*, 13(12), e0208647. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208647>.
- Wyckhuys K.A.G., Heong K.L., Sanchez-Bayo F., Bianchi F.J.J.A., Lundgren J.G., Bentley J.W., 2019. Ecological illiteracy can deepen farmers' pesticide dependency, *Environmental Research Letters*, 14, 093004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab34c9>.
- Wyckhuys K.A.G., Tang F.H.M., Hadi B.A., 2023. Pest management science often disregards farming system complexities, *Communications earth, environment*, 4, 223. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00894-3>.
- Xiongkui H., Bonds J., Herbst A., Langenakens J., 2017. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia, *Int. J. Agric., Biol. Eng.*, 10(3), 18-30.
- Yadav S.P.S., Lahutiya V., Paudel P., 2022. A review on the biology, ecology, and management tactics of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae), *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 10(12), 2467-2476.
- Yakhin O.I., Lubyantsev A.A., Yakhin I.A., Brown P.H., 2017. Biostimulants in plant sciences: a global perspective, *Frontiers in plant science* 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>.
- Yoon J.-S., Gurusay D., Palli S.R., 2017. Accumulation of dsRNA in endosomes contributes to inefficient RNA interference in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 90, 53-60.
- Yu N., Christiaens O., Liu J., Niu J., Cappelle K., Caccia S. *et al.*, 2013. Delivery of dsRNA for RNAi in insects: an overview and future directions, *Insect Science*, 20, 4-14.
- Zebelo S., Song Y., Klopper J.W., Fadamiro H., 2016. Rhizobacteria activates (β)-d-cadinene synthase genes and induces systemic resistance in cotton against beet armyworm (*Spodoptera exigua*), *Plant Cell Environ.*, 39, 935-943.
- Zhang D.J., Lu Z.Y., Liu J.X., Li C.L., Yang M.S., 2015. Diversity of arthropod community in transgenic poplar-cotton ecosystems, *Genetics and Molecular Research*, 14(4), 15713-15729.
- Zhang H., Yin W., Zhao J., Jin L., Yang Y., Wu S. *et al.*, 2011. Early warning of cotton bollworm resistance associated with intensive planting of Bt cotton in China, *PLoS ONE*, 6(8), e22874. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022874>.
- Zhang H., Li H.-C., Miao X.-X., 2013. Feasibility, limitation and possible solutions of RNAi-based technology for insect pest control, *Insect Science*, 20, 15-30.
- Zhang L., van der Werf W., Zhang S., Li B., Spiertz J.H.J., 2007. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems, *Field Crops Research*, 103, 178-188.
- Zhang R., Ren L., Wang C., Lin R., Tian C., 2004. Cotton aphid predators on alfalfa and their impact on cotton aphid abundance, *Appl. Entomol. Zool.*, 39(2), 235-241.
- Zhang X., Liu X., Ma J., Zhao J., 2013. Silencing of cytochrome P450 *CYP6B6* gene of cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*) by RNAi, *Bulletin of Entomological Research*, 103, 584-591.
- Zhang X.M., Lövei G.L., Ferrante M., Yang N.-W., Wan F.-H., 2020. The potential of trap and barrier cropping to decrease densities of the whitefly *Bemisia tabaci* MED on cotton in China, *Pest Management Science*, 76, 366-374.
- Zhaoshi L., Xueyue L., Wangfen Z., Juyun Z., Fei L., Desong Y. *et al.*, 2021. Growing cotton in China, in Matthews G., Miller T. (coord.), *Pest management in cotton. A global perspective*, CABI (Ed.), 80-100.

- Zhou Y., Wu Q., Zhang H., Wu K., 2021. Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China, *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3), 637-645.
- Zhu G.-H., Chereddy S.C.R.R., Howell J.L., Palli S.R., 2020. Genome editing in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*: multiple sgRNA/Cas9 method for identification of knockouts in one generation, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 122, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2020.103373>.
- Zhu K.Y., Palli S.R., 2020. Mechanisms, applications, and challenges of insect RNA interference, *Annual Review of Entomology*, 65, 293-311.
- Zotti M.J., Smaghe G., 2015. RNAi technology for insect management and protection of beneficial insects from diseases: lessons, challenges and risk assessments, *Neotropical Entomology*, 44, 197-213.

Relecture : Sophie De Decker
Mise en pages : Hélène Bonnet, Studio 9
Achevé d'imprimer en décembre 2024
par ISI Print (La Courneuve)
Numéro d'impression : 202411.0335
Dépôt légal : janvier 2025

Le cotonnier produit la majorité des fibres naturelles utilisées aujourd'hui dans la confection de vêtements. La production de cette fibre, matière première commercialisée à l'échelle mondiale, peut être réduite à néant si les attaques de maladies ou de ravageurs ne sont pas maîtrisées. L'ouvrage traite des méthodes utilisées pour la protection du cotonnier contre les attaques des insectes et des acariens et met l'accent sur les limites des techniques utilisables selon les contextes socio-économiques des pays producteurs, en Afrique et Amérique du Sud : espèces d'arthropodes impliquées, types de dégâts, régulation naturelle, stratégies et méthodes de contrôle disponibles...

Sur la base des pratiques existantes, les auteurs analysent les perspectives qui s'offrent aux producteurs de coton pour la protection de leurs cultures dans un monde confronté au changement climatique. Ils soulignent la nécessité de considérer les problèmes d'une manière globale et discutent de l'optimisation des approches en fonction des situations en prenant en compte par exemple la structure du paysage.

Cet ouvrage s'adresse à un public de scientifiques ou de professionnels intéressé par la santé des plantes et par la gestion raisonnée des ravageurs.

Pierre Jean Silvie est docteur en entomologie. Il a effectué toute sa carrière au Cirad. De 1984 à 2009, il a travaillé sur la gestion intégrée des ravageurs du cotonnier au Tchad, au Togo, au Bénin puis au Paraguay et au Brésil. Au sein d'un comité d'experts de l'Anses, il a analysé les risques phytosanitaires liés à certains arthropodes exotiques envahissants. Ses derniers travaux ont porté sur le management des connaissances liées à l'emploi d'extraits végétaux.

Bernard Papierok est ingénieur agronome et docteur ès sciences. Il a mené l'essentiel de ses recherches à l'Institut Pasteur, où il a été chef du département d'Écologie, responsable du laboratoire des Bactéries et champignons entomopathogènes puis de la Collection des champignons. Il a animé le groupe de travail « Entomopathogènes et nématodes parasites d'insectes » à l'Organisation internationale de lutte biologique, section régionale ouest-paléarctique.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com



25 €

ISBN : 978-2-7592-4000-5



ISSN : 1952-1251
Réf. : 02980