

RÉSUMÉ

En cultures d'aubergine sous abri froid, les populations de pucerons sont particulièrement difficiles à gérer en tout début de printemps. Pour pallier cette difficulté, une stratégie de protection basée sur l'utilisation de plantes-ressources et de plantes-banques a été mise au point et évaluée par le CTIFL. Les résultats obtenus montrent que cette stratégie permet de réguler efficacement les pullulations de pucerons les plus précoces, à partir du moment où les plantes-banques hébergent des proies de substitution au moins un mois avant l'arrivée des pucerons sur les plantes cultivées et que les plantes-ressources émettent leurs premières fleurs suffisamment tôt. Cependant, l'efficacité des processus de régulation naturelle semble liée au niveau d'affinité entre les espèces de pucerons à réguler et les espèces de prédateurs en présence d'une part et au statut azoté des plantes d'autre part.

CONSERVATION BIOLOGICAL CONTROL : PROTECTION OF EGGPLANT CROPS AGAINST APHIDS USING FLORAL RESOURCES AND BANKER PLANTS

In eggplant crops in unheated greenhouses, aphid populations are particularly difficult to manage in early spring. To overcome this difficulty, a control strategy based on the use of floral resources and banker plants was developed and evaluated by the CTIFL. The results obtained show that this strategy is effective in controlling the earliest aphid outbreaks, as long as the banker plants host substitute prey at least one month before the arrival of the aphids on the cultivated plants and the flowering plants emit their first flowers early enough. However, the efficiency of natural regulation processes seems to be linked on the one hand to the level of affinity between the aphid species to be regulated and the predator species present, and on the other, to the nitrogen status of the plants.

LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION

PROTECTION DES CULTURES D'AUBERGINE CONTRE LES PUCERONS À L'AIDE DE PLANTES-RESSOURCES ET DE PLANTES-BANQUES

Une stratégie de protection des cultures d'aubergine contre les pucerons basée sur l'utilisation de plantes-ressources et de plantes-banques a été mise au point et évaluée par le CTIFL de 2017 à 2019. Les résultats obtenus montrent que cette stratégie peut s'avérer efficace sous réserve de respecter certaines conditions.



> PLANTES-RESSOURCES ET PLANTES-BANQUES AU MILIEU D'UN ABRIS FROID

LES PUCERONS : PROBLÉMATIQUE MAJEURE EN CULTURE D'AUBERGINE

En culture d'aubergine, les pucerons constituent un problème récurrent, les principales espèces s'attaquant à l'aubergine étant *Macrosiphum euphorbiæ*, *Aulacorthum solani*, *Myzus persicæ* et *Aphis gossypii*. Ces pucerons peuvent être à l'origine de pertes de rendement très importantes en prélevant la sève élaborée, ce qui peut affaiblir voire conduire à la mort de la plante et en provoquant l'avortement des bourgeons floraux lorsqu'ils se trouvent sur l'apex. Ils peuvent également transmettre des virus phytopathogènes. Enfin, ils excrètent du miellat qui souille les fruits et les rend impropres à la commercialisation. Le miellat favorise par ailleurs le développement de fumagine à la surface des feuilles, ce qui peut entraver sérieusement la photosynthèse et gêner la croissance des plantes.

Pour protéger leurs cultures contre les pucerons, les producteurs utilisent généralement des produits phytosanitaires à base de pyréthrianoïdes mais ces produits peuvent avoir des effets délétères sur les insectes pollinisateurs (abeilles et bourdons notamment). Des produits alternatifs existent, comme le savon noir ou les produits à base de terpènes d'orange mais leur utilisation nécessite souvent plusieurs traitements pour être efficace. Souvent, des stratégies de lutte biologique par inondation (lâchers de prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons) sont aussi mises en œuvre. Si ces stratégies sont généralement efficaces pour gérer les pullulations de pucerons les plus tardives,

elles peinent en revanche à réguler les pullulations les plus précoces. Les prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons lâchés dans les tunnels de culture ont en effet besoin de temps pour s'acclimater et agir efficacement. De plus, l'efficacité des stratégies de lutte biologique par inondation peut être limitée en cas de spécificité d'hôte (problème souvent rencontré avec les parasitoïdes de pucerons). Elles sont enfin relativement coûteuses, dans la mesure où les lâchers prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons doivent être répétés dans le temps.

Pour favoriser les processus de régulation naturelle de façon précoce, éviter les problèmes de spécificité d'hôte et limiter le coût de la protection biologique, des stratégies de lutte biologique par conservation peuvent être mises en œuvre. Ce type de stratégie vise, via la mise en place de plantes-ressources et de plantes-banques, à maintenir les populations locales de prédateurs de pucerons dans les parcelles de culture et à les amplifier le plus tôt possible en saison en améliorant leur fitness.

OBJECTIFS À ATTEINDRE ET DÉMARCHE DE TRAVAIL

Afin d'évaluer l'efficacité d'une stratégie de protection des cultures d'aubergine sous abri froid contre les pucerons basée sur l'utilisation de plantes-ressources et de plantes-banques, le CTIFL a mené une étude de 2017 à 2019. Cette étude a été soutenue financièrement par le Programme national pluriannuel de développement agricole et rural (PNDAR 2014-

2020) ainsi que par l'Office français pour la biodiversité (OFB - Projet REGULEG 2018-2020). Dans cette étude, seuls les phénomènes de prédation des pucerons par leurs prédateurs ont été considérés. L'effet des plantes-ressources et des plantes-banques sur les parasitoïdes de pucerons s'attaquant à l'aubergine et le niveau de parasitisme subséquent n'a pas été pris en compte. Il a été considéré que cet effet pouvait être trop restreint à cause de phénomènes de spécificité d'hôte et que cela devait être étudié de façon approfondie dans une étude à part entière.

Les plantes-ressources et les plantes-banques utilisées dans la stratégie testée sont présentées dans l'article « Une nouvelle approche pour évaluer les stratégies de lutte biologique par conservation » publié dans le numéro n° 373 d'INFOS-CTIFL, tout comme la méthodologie employée pour évaluer l'efficacité de cette stratégie (Picault, 2021). Cette méthodologie fait appel à une approche « mécaniste », qui consiste à évaluer une stratégie de lutte biologique par conservation à l'aune d'un indice d'infestation, défini comme le produit du niveau d'infestation (i.e. pourcentage de plantes fortement infestées par les pucerons) et de la durée d'infestation (délai entre le début de croissance exponentielle des populations de pucerons sur le feuillage des plantes et la disparition des pucerons). Pour une période d'infestation donnée (une période d'infestation primaire et une période d'infestation secondaire peuvent être observées en culture d'aubergine sous abri froid), la stratégie est considérée comme efficace si l'indice d'infestation est inférieur à 100 (objectif d'infestation) et inefficace s'il est supérieur à 100. Dans l'approche « mécaniste », les processus écologiques en jeu dans le système de culture sont d'abord décrits à l'aide d'indicateurs (déconstruction d'une réalité complexe) et de diagrammes séquentiels (reconstruction d'une réalité simplifiée). Les diagrammes séquentiels obtenus sont ensuite confrontés à des hypothèses de régulation théoriques définies en préalable : hypothèse de régulation pour un système de culture « conventionnel » (i.e sans plantes-ressources ni plantes-banques) et hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif (i.e. avec plantes-ressources et plantes-banques). Lorsque les diagrammes séquentiels sont conformes à l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif, les processus de



> LARVE DE COCCINELLE AU MILIEU DE PUCERONS

régulation naturels initiés par la présence de plantes-banques dans les abris froids sont considérés comme « opérants ». Si, dans ce cas-là, l'objectif d'infestation est atteint, la stratégie testée est considérée comme efficace. A contrario, si l'objectif d'infestation n'est pas atteint, la stratégie testée est considérée comme inefficace. Lorsque les diagrammes séquentiels vérifient l'hypothèse de régulation pour un système de culture conventionnel, les processus de régulation naturels initiés par la présence de plantes-banques dans les abris froids sont considérés comme « inopérants ». Si, dans ce cas-là, l'objectif d'infestation est atteint, l'efficacité de la régulation ne peut pas être attribuée à la stratégie testée mais à d'autres facteurs qui doivent être déterminés. A contrario, si l'objectif d'infestation n'est pas atteint, la stratégie testée ne peut pas être considérée comme inefficace car elle n'aura pas été réellement mise en œuvre (les mécanismes écologiques attendus n'ont pas été enclenchés).

Dans notre étude la relation entre les indicateurs liés à la dynamique d'infestation des plantes-banques (indice de précocité : délai entre l'arrivée des pucerons sur les plants d'aubergine et l'arrivée des proies de substitution sur les plantes-banques, exprimé en nombre de semaines), au statut azoté des plantes (indice de nutrition azotée : écart entre la teneur en nitrates mesurée dans le feuillage des aubergines et la teneur en nitrates critique définie dans la méthode PILazo© développée par le CTIFL pour piloter la fertilisation azotée des cultures d'aubergine, exprimé en

mg/l) et au niveau d'infestation des aubergines par les pucerons (indice d'infestation) a également été étudiée.

UN DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DÉPLOYÉ SUR TROIS ANS

L'efficacité de la stratégie de lutte biologique par conservation mise au point par le CTIFL a été évaluée à l'aune d'une stratégie témoin (aucune protection contre les pucerons), dans le cadre d'une expérimentation au champ qui a été répliquée trois fois de 2017 à 2019 (un réplique par an). Le dispositif expérimental mis en place est constitué de deux tunnels d'aubergine aménagés avec les plantes-ressources et les plantes-banques choisies pour favoriser la régulation des populations de pucerons par leurs prédateurs (tunnels A1 & A2 dits tunnels aménagés) et de deux tunnels d'aubergine sans aucune protection contre les pucerons (tunnels T1 & T2 dits tunnels témoins). Dans chaque tunnel, les populations de pucerons sont suivies tous les 15 jours sur le feuillage des plantes-banques et des aubergines à l'aide d'une échelle de classe (échelle de classe « REGULEG - Aubergine »). En même temps que la taille des populations de pucerons est estimée, les prédateurs de pucerons sont dénombrés de visu. La température des tunnels est suivie à un pas de temps journalier et le statut azoté des aubergines est caractérisé tous les 15 jours en mesurant la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes. Enfin, la production de fruits est estimée dans chaque

tunnel en enregistrant le nombre total de caisse d'aubergines produites à chaque date de récolte. Le dispositif expérimental mis en place ainsi que les mesures et les observations réalisées pour évaluer l'efficacité de la stratégie testée sont décrits dans le rapport « Mise au point et évaluation d'une stratégie de protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques » disponible sur demande, ainsi que dans l'article « Une nouvelle approche pour évaluer les stratégies de lutte biologique par conservation » publié dans le numéro n° 373 d'INFOS-CTIFL (Picault, 2021).

L'EFFICACITÉ DE LA STRATÉGIE DE LUTTE BIOLOGIQUE VARIE D'UNE SITUATION À L'AUTRE

ÉCHEC DE LA STRATÉGIE DE LUTTE BIOLOGIQUE EN 2017 ET 2018

Des plantes-banques inopérantes

Les résultats obtenus montrent qu'en 2017 et 2018, l'infestation primaire des aubergines par les pucerons n'est pas mieux gérée dans les tunnels aménagés A1 et A2 que dans les tunnels témoins T1 et T2 et l'objectif d'infestation n'est atteint dans aucun de ces deux tunnels (Tableau 1 : 135). La stratégie testée n'a donc pas permis de réguler efficacement les populations de pucerons. L'analyse des dynamiques de populations (Figure 1) et des diagrammes séquentiels subséquents élaborés pour les années 2017 et 2018 (Figure 2) montre que la succession temporelle des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons observée sur les aubergines des tunnels aménagés A1 et A2 est identique à celle observée sur les aubergines des tunnels témoins T1 et T2 et qu'elle correspond à l'hypothèse de régulation pour un système de culture conventionnel. Par ailleurs, dans les tunnels aménagés A1 et A2, la succession temporelle des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques ne correspond pas à l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif. En 2017 comme en 2018, les tunnels aménagés se sont donc comportés comme les tunnels témoins et la présence de plantes-ressources et de plantes-banques dans ces tunnels n'a rien changé à la chronologie habituelle des mécanismes biologiques en jeu dans les processus de régulation naturelle. Dans tous les tunnels aména-



> AUBERGINES BORDÉES PAR DE L'ACHILLÉE MILLEFEUILLE

gés, les prédateurs de pucerons sont intervenus trop tard pour que le niveau d'infestation des aubergines par les pucerons ne dépasse pas le seuil de nuisibilité économique.

L'échec de la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre en 2017 et 2018 dans les tunnels aménagés A1 et A2 est dû au fait que les pucerons servant de proie de substitution ne se sont

installés sur les plantes-banques que très tardivement. En effet, dans tous les tunnels aménagés étudiés en 2017 et 2018, ces pucerons sont arrivés sur les plantes-banques au moment où les pucerons s'attaquant aux cultures légumières se sont installés sur les aubergines, voire quelques semaines plus tard (Tableau 1 : I30). En 2018, le niveau d'infestation des plantes-banques par les pucerons ser-

vant de proie de substitution est par ailleurs très faible (Tableau 1 : I2). Ces deux caractéristiques du système biologique en place en 2017 et 2018 font que les populations de prédateurs de pucerons n'ont pas eu le temps de se développer dans les tunnels et d'être opérationnelles avant l'arrivée des pucerons s'attaquant aux cultures légumières sur les aubergines. Une situation où les pucerons ser-

TABLEAU 1 : EXEMPLE D'INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES PROCESSUS DE RÉGULATION NATURELLE DANS LES TUNNELS AMÉNAGÉS ET TÉMOINS ÉTUDIÉS

| Indic. | 2017 | | | | 2018 | | | | 2019 | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | A1 | A2 | T1 | T2 | A1 | A2 | T1 | T2 | A1 | A2 | T1 | T2 |
| I2 | | | | | 16 | 27 | | | 100 | | | |
| I8 | AN | ME | | | MD | AN | | | | | | |
| I9 | AN | | | | MD | RPSA.MD | | | | | | |
| I10 | | | | | | | | | AU | AU | | |
| I11 | | | | | | | | | MM | MPCT | | |
| I15 | 805 | 99 | | | 96 | 46 | | | 91 | 86 | | |
| I18 | 1668 | 551 | | | 204 | 104 | | | 928 | 518 | | |
| I27 | 20 | | | | 20 | | 24 | 22 | 16 | | | |
| I30 (IP1) | - 2 | | | | 0 | 2 | | | 9 | | | |
| I35 (INF1) | 315 | 450 | | | 387 | 450 | 65 | 637 | 6 | 46 | 228 | 196 |
| I36 | ME | | | | ME | | AG | | MP | | | |
| I37 (IN1) | | | | | 1 629 | 1 661 | 499 | 2 155 | 696 | 1 511 | 682 | 1 220 |
| I39 | 32 | | | | | | | | 20 | | 24 | |
| I40 | | | | | | | | | 9 | | 5 | |
| I48 (INF2) | 160 | 40 | 0 | 75 | 30 | 18 | 0 | | 194 | 306 | 23 | 118 |
| I50 (IN2) | | | | | - 20 | 660 | - 620 | - 620 | 1 909 | 2 649 | 1 109 | 1 958 |
| I70 | 4 565 | 4 557 | 4 490 | 4 507 | 4 146 | 4 146 | 4 306 | 4 185 | 4 622 | 4 622 | 4 690 | 4 648 |

Au total, 70 indicateurs ont été calculés dans le projet REGULEG (cf. rapport « Mise au point et évaluation d'une stratégie de protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques » - Picault, 2021).

I2 : fréquence de plantes-banques fortement infestées pendant la période d'infestation (%)

I8 : espèce de pucerons majoritaire sur l'asclépias pendant la période d'infestation

I9 : espèce de pucerons majoritaire sur le blé pendant la période d'infestation

I10 : espèce de pucerons majoritaire sur l'ortie pendant la période d'infestation

I11 : espèce de pucerons majoritaire sur la tanaïs pendant la période d'infestation

I15 : vitesse d'accroissement des populations de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques (Nb ind./sem.)

I18 : activité totale des prédateurs de pucerons sur les plantes-banques en fin de croissance exponentielle (Nb total d'ind. cum.)

I27 : début de croissance exponentielle des populations de pucerons sur les aubergines pendant la période d'infestation primaire (N° semaine)

I30 : délai entre le début d'infestation primaire des aubergines et le début d'infestation des plantes-banques (Nb semaines)

I35 : indice d'infestation primaire

I36 : espèce majoritaire de pucerons sur les aubergines pendant la période d'infestation primaire

I37 : indice de nutrition azotée pendant la période d'infestation primaire (mg/l)

I39 : début de croissance exponentielle des populations de pucerons sur les aubergines pendant la période d'infestation secondaire (N° semaine)

I40 : durée de la période d'infestation secondaire sur les aubergines (Nb semaines)

I48 : indice d'infestation secondaire

I50 : indice de nutrition azotée pendant la période d'infestation secondaire (mg/l)

I70 : somme de températures dans les tunnels (°C)

MP : *Myzus persicae*

AN : *Aphis nerii*

MD : *Metopolophium dirhodum*

RP : *Rhopalosiphum padi*

SA : *Sitobion avenae*

CT : *Coloradoa Tanacetina*

vant de proie de substitution s'installent sur les plantes-banques au moment où les pucerons s'attaquant aux cultures légumières s'installent sur les aubergines est en effet une situation qui vérifie l'hypothèse de régulation attendue pour un système de culture conventionnel et non l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif (Figure 2). En 2017 et 2018, les plantes-banques et les plantes-ressources n'ont donc pas exercé leur fonction et peuvent donc être considérées comme « inactives » ou « inopérantes » (manque de précocité et/ou niveau d'infestation insuffisant).

La vitesse d'accroissement des populations de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques déterminerait en partie l'efficacité de la stratégie de lutte biologique mise en œuvre

En 2017, le niveau d'infestation primaire ainsi que l'indice d'infestation primaire sont légèrement plus faibles dans le tunnel aménagé A1 que dans le tunnel aménagé A2, alors que les conditions d'aménagement, de température et de nutrition azotée sont similaires (Tableau 1 : I70 et I35). Cette année-là, la principale différence entre les deux tunnels réside dans la vitesse d'accroissement des populations de prédateurs de puceron sur les plantes-banques, qui est plus élevée dans le tunnel A1 que dans le tunnel A2 (Tableau 1 : I15). Cette vitesse d'accroissement plus rapide se traduit in fine par une activité totale des prédateurs de pucerons sur les plantes-banques plus

élevée dans le tunnel A1 que dans le tunnel A2 (Tableau 1 : I18). Il est possible que cela ait contribué à favoriser la régulation naturelle des populations de pucerons sur les aubergines. Cette observation est intéressante, car elle indique que la vitesse d'accroissement des populations de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques pourrait être considérée comme un facteur d'efficacité des stratégies de lutte biologique par conservation, même si ce facteur ne semble pas suffire à lui seul pour maintenir le niveau d'infestation des aubergines par les pucerons en deçà du seuil de nuisibilité économique. Cette hypothèse reste cependant à vérifier.

Le sarrasin pourrait constituer un facteur de risque

En 2018, l'infestation primaire des aubergines par les pucerons est plus précoce dans les tunnels aménagés A1 et A2 que dans les tunnels témoins T1 et T2 (Figure 1 ; Tableau 1 : I27). Par ailleurs, l'espèce de puceron majoritaire sur les aubergines des tunnels A1 et A2 pendant cette période d'infestation est *M. euphorbiae*, alors qu'il s'agit d'*A. gossypii* dans les tunnels T1 et T2 (Tableau 1 : I36). Des températures plus basses dans les tunnels aménagés que dans les tunnels témoins pourraient expliquer la différence entre les deux groupes de tunnels, *M. euphorbiae* pouvant se développer à des températures plus basses qu'*A. gossypii*. Cependant, cette hypothèse n'est pas valide, car les conditions de température sont similaires d'un tunnel à

l'autre (Tableau 1 : I70). Le statut azoté des aubergines pourrait aussi expliquer cette différence, mais cette hypothèse n'est, encore une fois, pas valide car la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes varie davantage entre les tunnels T1 et T2 qu'entre le groupe de tunnels T1 + T2 et le groupe de tunnels A1 + A2 (Tableau 1 : I37). Finalement, le seul élément qui pourrait discriminer le groupe de tunnels A1 + A2 et le groupe de tunnels T1 + T2 est la présence ou l'absence de plantes de service dans le système de culture. Il est ainsi possible que certaines plantes-banques et/ou certaines plantes-ressources aient attiré et hébergé très précocement *M. euphorbiae* dans les tunnels aménagés, donnant la possibilité à ce puceron de coloniser rapidement et massivement le feuillage des aubergines juste après la plantation de la culture. Cependant, cette hypothèse n'est pas valide pour les plantes-banques du tunnel A1, dans la mesure où les espèces de pucerons retrouvées en majorité sur ces plantes sont *Metopolophium dirhodum* (sur le blé et l'asclépias), *Sitobion avenae* (sur le blé) et *Rhopalosiphum padi* (sur le blé) (Tableau 1 : I8 à I11). Cette hypothèse n'est pas non plus valide pour les plantes-banques du tunnel A2, dans la mesure où l'espèce de puceron retrouvée en majorité sur le blé est *M. dirhodum* et que *M. euphorbiae*, majoritaire sur l'asclépias, ne s'y est installé que deux mois après que les aubergines ont commencé à être infestées par cette espèce de puceron (il est donc très probable que ce soient les aubergines qui aient joué un rôle de réservoir d'inoculum pour l'asclépias plutôt que l'inverse).

En revanche, cette hypothèse pourrait être valide pour les plantes-ressources des tunnels aménagés A1 et A2, des pucerons ayant été observés en grandes quantités sur le sarrasin quelques jours avant la plantation des aubergines. La structure des communautés de pucerons présentes sur le sarrasin n'a toutefois pas été déterminée dans cette étude et cette hypothèse ne peut être confirmée. Néanmoins, cette hypothèse est confortée par des observations effectuées en 2020 dans des tunnels d'aubergines dotés de patches de sarrasin, qui ont montré que le sarrasin pouvait être colonisé précocement et massivement par *M. euphorbiae* et servir de source pour une colonisation ultérieure des cultures d'aubergine adjacentes.



> PUCERONS SUR ORTIE

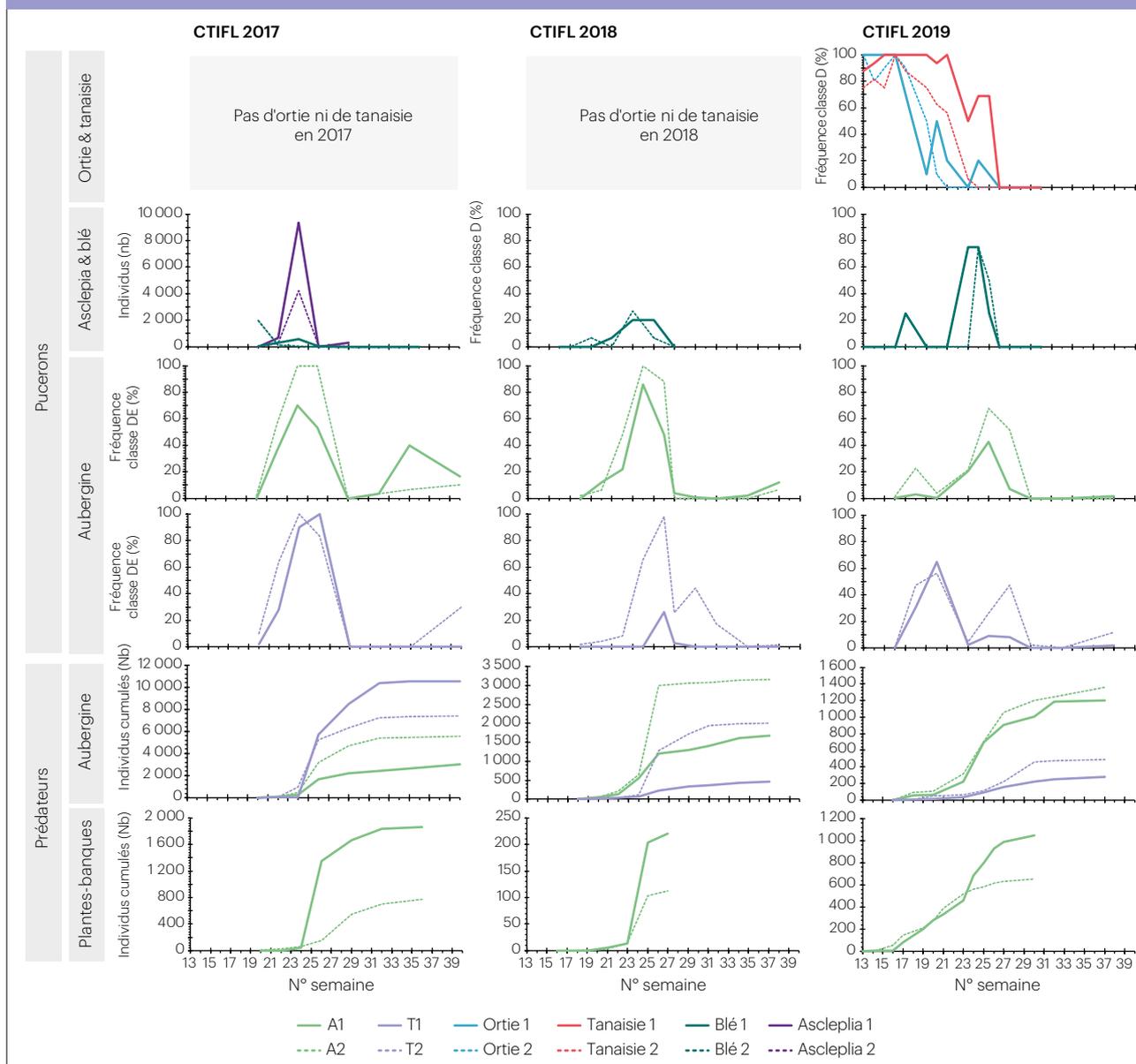
Les populations de pucerons seraient favorisées par l'excès de nitrates dans le feuillage des plantes

En 2018, l'infestation primaire des aubergines par les pucerons est bien mieux gérée dans le tunnel témoin T1 que dans le tunnel témoin T2 (Figure 1). Dans le tunnel T1, l'objectif d'infestation est en effet atteint, alors que ce n'est pas le cas dans le tunnel T2 (Tableau 1 : I35). Les conditions d'aménagement (absence de plantes-banques et de plantes-ressources) et de température étant similaires dans les deux tunnels (Tableau 1 : I70), ces deux facteurs ne peuvent pas expliquer l'écart

entre l'indice d'infestation mesuré dans le tunnel T1 et celui mesuré dans le tunnel T2. En revanche, la teneur en nitrates dans le feuillage des aubergines et par conséquent l'indice de nutrition azotée sont plus élevés dans le tunnel T2 que dans le tunnel T1 (Tableau 1 : I37). Il est possible qu'un excès de nitrates dans le feuillage des plantes par rapport aux besoins de celles-ci favorise la croissance des populations de pucerons, qui deviennent alors plus difficiles à maîtriser en l'absence d'ennemis naturels prêts à agir. Le ratio protéines/carbohydrates et par conséquent le ratio N/C, de la sève

du phloème constitue en effet l'un des facteurs essentiels dans l'attractivité d'une plante-hôte vis-à-vis des insectes phytophages piqueurs-suceurs (pucerons, thrips). Les larves de tels insectes s'intéressent particulièrement aux plantes pour lesquelles ce ratio est compris entre 0,8 et 1,5. Ce ratio, habituellement proche de 0,1 dans les plantes cultivées, croît avec la dose d'azote apportée à la culture, dans la mesure où celle-ci entraîne une augmentation de la concentration de la sève du phloème en acides aminés. Par conséquent, une fertilisation azotée excessive est susceptible d'augmenter

FIGURE 1 : Cinétique des populations de pucerons et des prédateurs de pucerons sur les plantes-banques et les aubergines en 2017, 2018 et 2019



joué un rôle de plantes-banques pour elles-mêmes : les ennemis naturels attirés pendant la période d'infestation primaire seraient ensuite restés actifs à minima et auraient empêché l'avènement d'une période d'infestation secondaire. Enfin, il est possible que le petit pic d'infestation secondaire observé dans le tunnel A1 en 2017 soit lié à un excès de nitrates dans le feuillage des plantes qui aurait pu affecter l'efficacité des processus de régulation naturelle. Néanmoins, cette hypothèse ne peut pas être vérifiée, la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes n'ayant pas été mesurée cette année-là.

SUCCÈS (CONDITIONNÉ) DE LA STRATÉGIE DE LUTTE BIOLOGIQUE EN 2019

Des plantes-banques « opérantes » pendant la période d'infestation primaire...

En 2019, l'infestation des aubergines par les pucerons pendant la période d'infestation primaire est mieux gérée dans les tunnels aménagés A1 et A2 que dans les tunnels témoins T1 et T2 (Figure 1). En effet, l'objectif d'infestation est atteint dans les deux tunnels aménagés mais pas dans les deux tunnels témoins (Tableau 1 : I35). Cette année-là, la stratégie de protection

des cultures d'aubergine contre les pucerons basée sur l'utilisation de plantes-banques et de plantes-ressources a donc permis de réguler efficacement les populations de pucerons pendant la période d'infestation primaire. L'analyse des diagrammes séquentiels élaborés pour l'année 2019 montre que, dans les tunnels aménagés A1 et A2, les successions temporelles des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons sur les aubergines d'une part et sur les plantes-banques d'autre part, correspondent à l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif ce qui n'était le cas ni en 2017, ni en 2018 (Figure 2). Dans les tunnels témoins T1 et T2, la succession temporelle des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons sur les aubergines correspond quant à elle à l'hypothèse de régulation pour un système de culture conventionnel avec toutefois une intervention des prédateurs de pucerons particulièrement tardive.

Il est possible que la capacité de la stratégie de lutte biologique par conservation à réguler les populations de pucerons dans les tunnels aménagés A1 et A2 pendant la période d'infestation primaire s'explique par l'arrivée précoce des pucerons servant de proie de substitution sur les

plantes-banques (deux mois avant que les pucerons ne s'installent sur les aubergines) (Tableau 1 : I30). En 2019, le niveau d'infestation des plantes-banques par les pucerons servant de proie de substitution est de plus très élevé (Tableau 1 : I2). Ces deux caractéristiques du système biologique suggèrent que les populations de prédateurs de pucerons ont eu le temps de se développer massivement dans les tunnels aménagés et d'être opérationnelles bien avant l'arrivée des premiers pucerons sur les aubergines. En 2019, les plantes-banques et les plantes-ressources ont donc exercé pleinement leur fonction et peuvent donc être considérées comme « actives » ou « opérantes » (niveaux de précocité et/ou d'infestation suffisants). Il est aussi possible que le succès observé en 2019 s'explique en partie par la floraison précoce des plantes-ressources (cf. paragraphes précédents).

... Et efficaces dans un contexte où l'excès de nitrates dans le feuillage des plantes est faible ou modéré

Pendant la période d'infestation primaire, la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre en 2019 est aussi efficace dans un contexte où la teneur en nitrates dans le feuillage

FIGURE 2 (LÉGENDE) : Diagrammes séquentiels décrivant la dynamique de colonisation des plantes-banques et des aubergines par les pucerons et leurs prédateurs dans les tunnels aménagés A1 et A2 et dans les tunnels témoins T1 et T2 suivis en 2017, 2018 et 2019

| Bilan | | E (espèces de pucerons et de prédateurs de pucerons) | |
|--|--|--|--|
| S | Succès (objectif atteint : indice d'infestation < 100) | ME | <i>Macrosiphum euphorbiae</i> |
| E | Échec (objectif non atteint : indice d'infestation > 100) | MP | <i>Myzus persicae</i> |
| IN (indice de nutrition azotée : NO₂ mesuré - NO₃ critique) | | AG | <i>Aphis gossypii</i> |
| < 500 mg/l | Situation optimale | AN | <i>Aphis nerii</i> |
| 501 à 1 000 mg/l | Excès faible | MD | <i>Metopolophium dirhodum</i> |
| 1 001 à 1 600 mg/l | Excès modéré | RP | <i>Rhopalosiphum padi</i> |
| > 1 600 mg/l | Excès fort | SA | <i>Sitobion avenae</i> |
| Cinétique d'infestation ou cinétique des populations | | MM | <i>Macrosiphoniella millefolii</i> |
| | Arrivée des premiers individus | CT | <i>Colorado Tanacetina</i> |
| | Croissance du niveau d'infestation ou du niveau d'activité | A1 | Coccinelles juvéniles |
| | Pic d'infestation ou pic d'activité faible | A2 | Coccinelles matures |
| | Pic d'infestation ou pic d'activité fort | B | Cécidomyies |
| | Décroissance du niveau d'infestation ou du niveau d'activité | C1 | Coccinelles juvéniles puis cécidomyies |
| | Fin d'activité des populations | C2 | Forficules + araignées puis coccinelles juvéniles puis cécidomyies |
| PB (plantes-banque) | | D1 | Coccinelles matures puis chrysopes |
| O | Opérantes | D2 | Coccinelles matures puis chrysopes puis cécidomyies |
| I | Inopérantes | E1 | Araignées puis coccinelles juvéniles puis cécidomyies |
| T : somme de températures dans les abris froids (°C) | | E2 | Araignées + syrphes puis coccinelles juvéniles puis cécidomyies |
| S1 à S12 : situations étudiées | | E3 | Araignées puis coccinelles matures puis cécidomyies |
| A1 & A2 : tunnels « aménagés » | | F | Punaises prédatrices |
| T1 & T2 : tunnels « témoins » | | G | Punaises prédatrices puis coccinelles juvéniles |
| Début d'infestation (N° semaine) | 16 16 | Début d'activité (N° semaine) | 21 21 |
| Début de croissance exponentielle (N° semaine) | 16 16 | Début de croissance exponentielle (N° semaine) | 24 24 |
| Pic d'infestation (N° semaine) | 20 20 | Pic d'activité (N° semaine) | 27 27 |
| Fin d'infestation (N° semaine) | 23 23 | Fin de croissance exponentielle (N° semaine) | 30 30 |
| | | Fin d'activité (N° semaine) | 32 32 |

des plantes est légèrement en excès par rapport aux besoins de la plante (cas du tunnel aménagé A1) que dans un contexte où l'excès en nitrates dans le feuillage des plantes est modéré (cas du tunnel aménagé A2). Enfin, contrairement à ce qui a été observé en 2018, les populations de pucerons n'ont été régulées dans aucun des deux tunnels témoins pendant la période d'infestation primaire (Figure 1 ; Tableau 1 : I35). Il est possible que cela soit lié à une teneur en nitrates excessive dans le feuillage des plantes. En 2019, cette teneur est en effet en situation d'excès faible à modéré dans les deux tunnels témoins, alors qu'en 2018 elle est proche de l'optimum (la teneur en nitrates dans le feuillage correspond aux besoins de la plante) dans le tunnel témoin où les populations de pucerons ont été régulées efficacement (Tableau 1 : I37).

Des plantes-banques opérantes pendant la période d'infestation secondaire...

En 2019, une période d'infestation secondaire significative est observée dans les tunnels aménagés A1 et A2 comme dans les tunnels témoins T1 et T2 (Figure 1 ; Tableau 1 : I40). Comme indiqué précédemment, toute période d'infestation secondaire est particulière car, en ayant déjà été infestées une première fois et en ayant par conséquent déjà attiré vers elles de nombreux ennemis naturels de pucerons à cette occasion, les plantes cultivées jouent un rôle de plantes-banques pour elles-mêmes. Pendant la période d'infestation secondaire, l'ensemble des tunnels étudiés peuvent ainsi être considérés comme des tunnels aménagés.

... Mais inefficaces dans un contexte où la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes est excessive

Les résultats obtenus en 2019 montrent que, pendant la période d'infestation secondaire, l'objectif d'infestation n'est pas atteint dans les tunnels A1, A2 et T2 (Tableau 1 : I48). En revanche, cet objectif est atteint dans le tunnel T1. L'analyse des diagrammes séquentiels élaborés pour l'année 2019 montre que, dans tous les tunnels et pour la période d'infestation secondaire, les successions temporelles des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons sur les aubergines et/ou les plantes-banques correspondent pourtant à l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif (Figure 2).

Les plantes-banques et les plantes-res-sources ont donc exercé pleinement leur fonction et peuvent donc être considérées comme « actives » ou « opérantes » (niveaux de précocité et/ou d'infestation suffisants) pendant la période d'infestation secondaire comme elles l'ont été pendant la période d'infestation primaire. Par ailleurs, les conditions d'aménagement (présence de plantes-banques) et de température étant similaires dans l'ensemble des tunnels (Tableau 1 : I70), ces deux facteurs ne peuvent pas expliquer l'écart entre l'indice d'infestation mesuré dans les tunnels A1, A2 et T2 et celui mesuré dans le tunnel T1. En revanche, la teneur en nitrates dans le feuillage des aubergines et par conséquent l'indice de nutrition azotée sont plus élevés dans les trois premiers tunnels que dans le dernier (Tableau 1 : I50). Il est ainsi possible que, dans un contexte où l'excès en nitrates dans le feuillage des plantes est faible ou modéré (indice de nutrition azoté < 1 600), comme c'est le cas dans le tunnel T1 pendant la période d'infestation secondaire, les processus de régulation naturelle en jeu soient suffisamment efficaces pour maintenir le niveau d'infestation des plantes par les pucerons en deçà du seuil de nuisibilité économique. A contrario, dans un contexte où l'excès en nitrates dans le feuillage des plantes est particulièrement fort (indice de nutrition azoté > 1 600), comme c'est le cas des tunnels A1, A2 et T2 pendant la période d'infestation secondaire, les processus de régulation naturelle en jeu ne seraient plus

suffisamment efficaces pour maintenir le niveau d'infestation des plantes par les pucerons en deçà du seuil de nuisibilité économique. Cette hypothèse est renforcée par le fait que les populations de pucerons ont été régulées efficacement dans les tunnels A1 et A2 pendant la période d'infestation primaire, période pendant laquelle l'excès en nitrates dans le feuillage des plantes était faible à modéré. Elle semble également vérifiée par ce qui s'est passé dans le tunnel A2, dans lequel l'indice d'infestation est plus élevé que dans tous les autres tunnels et l'excès en nitrates dans le feuillage des plantes relativement important. Dans ce tunnel, il est de plus possible que l'influence d'un excès de nitrates sur le niveau d'infestation des plantes par les pucerons ait été exacerbée par le fait que l'activité des prédateurs de pucerons sur les plantes-banques a cessé plus tôt par rapport à ce qui est observé dans le tunnel T1.

Il est possible qu'un excès de nitrates dans le feuillage des plantes accélère la croissance des populations de pucerons (qui deviennent alors plus difficiles à maîtriser), ralentisse l'action des prédateurs de pucerons (qui deviennent alors moins efficaces) et aboutisse à un décrochage des processus de régulation naturelle. Cette hypothèse est confortée par les connaissances théoriques relatives à la réponse fonctionnelle d'un prédateur à sa proie. La fertilisation azotée des cultures, en influençant les paramètres biodémographiques des populations de pucerons, influence en effet l'interaction de celles-ci



> COCCINELLE SUR UNE FEUILLE DE TANAISIE

avec les populations de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons. Pour une plante-hôte donnée, les chrysopes et les coccinelles consomment ainsi davantage de pucerons sur les plantes les moins riches en azote, car le rapport N/C de celles-ci favorise le développement de pucerons plus légers et de plus petite taille. La quantité de biomasse totale consommée par une larve de chrysope ou de coccinelle étant invariable, celle-ci doit alors consommer davantage de proies pour être rassasiée (Aqueel, 2014). Par ailleurs, le temps passé par une larve de chrysope ou de coccinelle à consommer un puceron, tout comme le temps consacré à la digestion, est plus court lorsque les pucerons sont légers et petits. Il est aussi possible que la teneur en azote des pucerons influence le niveau d'appétence des prédateurs pour ces derniers, mais cela reste à vérifier (Hosseini *et al.*, 2019). Enfin, si la capacité de prospection des chrysopes et des coccinelles à la recherche de leurs proies n'est pas directement affectée par le niveau de fertilisation azotée, un excès de fertilisation azotée ferait passer les coccinelles d'une réponse fonctionnelle de type I (relation linéaire entre le nombre de proies consommées et le nombre de proies disponibles) ou II (augmentation du nombre de proies consommées lorsque le nombre de proies augmente, puis arrêt de la consommation à cause d'un phénomène de satiété) à une réponse fonctionnelle de type III (le prédateur ne consomme pas les proies lorsque les effectifs de celles-ci sont faibles ou au contraire très importants), ce qui réduit drastiquement l'efficacité des processus de régulation naturelle (Hosseini *et al.*, 2018).

PROPOSITION D'UN INDICE DE RÉUSSITE POUR ANTICIPER L'EFFICACITÉ DES PROCESSUS DE RÉGULATION NATURELLE ET RÉAGIR EN CONSÉQUENCE

Dans cette étude, les populations de pucerons ont été régulées efficacement pendant la période d'infestation primaire (indice d'infestation < 100) dans 3 situations sur 12 (soit 25 % des situations, une situation étant considérée comme 1 tunnel x 1 année d'étude) : 2 situations aménagées (soit 33 % des situations aménagées) et 1 situation témoin (soit 17 % des situations témoins). Pendant



> LARVES DE CÉCIDOMYIES AU MILIEU DE PUCERONS

la période d'infestation secondaire, les populations de pucerons ont été régulées efficacement dans 8 situations sur 12 (soit 67 % des situations) : 3 situations aménagées (soit 50 % des situations aménagées) et 5 situations témoins (soit 83 % des situations témoins). Le taux de réussite bien plus élevé pour la période d'infestation secondaire s'explique par le fait que, en ayant déjà été infestées une première fois et en ayant par conséquent déjà attiré vers elles de nombreux ennemis naturels de pucerons à cette occasion, les aubergines jouent un rôle de plantes-banques pour elles-mêmes. Pendant la période d'infestation secondaire, tous les tunnels étudiés peuvent ainsi être considérés comme des tunnels aménagés.

Le taux de réussite relativement faible pour la période d'infestation primaire s'explique par le fait que les plantes-banques sont absentes dans les tunnels témoins et que celles-ci ne sont pas toujours « opérantes » dans les tunnels aménagés. Pour qu'une plante-banque soit « opérante », il faut que les pucerons servant de proie de substitution s'y installent bien avant que les pucerons s'attaquent aux cultures légumières n'arrivent sur les aubergines (un à deux mois) et que le niveau d'infestation des plantes-banques par les pucerons servant de proie de substitution soit relativement élevé (pourcentage de plantes-banques fortement infestées par les pucerons > 50 %). Le concept de plante-banque « opérante » / « inopérante »

pourrait ainsi expliquer en partie le succès ou l'échec des processus de régulation biologique en jeu dans un cas de figure donné : un cas de figure correspond à 1 tunnel x 1 année d'étude x 1 période d'infestation. En effet, l'objectif d'infestation est atteint dans 71 % des cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « opérantes » : 10 des 14 cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « opérantes » : 2 cas en période d'infestation primaire ; 8 cas en période d'infestation secondaire. Il n'est pas atteint dans 90 % des cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « inopérantes » : 9 des 10 cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « inopérantes » : 9 cas en période d'infestation primaire ; aucun cas en période d'infestation secondaire.

Si le caractère « opérant » / « inopérant » des plantes-banques semble jouer un rôle prépondérant dans le succès ou l'échec d'une stratégie de lutte biologique par conservation, il n'en constitue pas le seul facteur de réussite. En effet, il existe des cas de figure où l'objectif d'infestation n'est pas atteint alors que les plantes-banques qui peuvent être des plantes de service implantées dans la culture pour exercer spécifiquement cette fonction ou bien les aubergines elles-mêmes pour la période d'infestation secondaire sont considérées comme « opérantes ». Cela est constaté dans 4 des 14 cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « opérantes » : aucun cas en

période d'infestation primaire ; 4 cas en période d'infestation secondaire.

À l'inverse, il existe des cas de figure où l'objectif d'infestation est atteint alors que les plantes-banques sont considérées comme « inopérantes ». Cela est constaté dans 1 des 10 cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « inopérantes » : 1 cas en période d'infestation primaire ; aucun cas en période d'infestation secondaire. Il est possible que ces résultats contre-intuitifs a priori s'expliquent par la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes. En effet, dans 3 des 4 cas de figure où l'objectif d'infestation n'est pas atteint alors que les plantes-banques sont considérées comme « opérantes », la teneur en nitrates dans le feuillage est en fort excès par rapport aux besoins de la plante (indice de nutrition azotée > 1 600). Dans 1 de ces 4 cas de figure, la teneur en nitrates dans le feuillage n'est pas connue ; cette hypothèse reste donc plausible mais à vérifier. A contrario, l'objectif d'infestation est atteint dans tous les cas de figure où les plantes-banques sont considérées comme « opérantes » et où la teneur en nitrates dans le feuillage est déficitaire, optimale (indice de nutrition azotée < 500 mg/l), légèrement en excès (indice de nutrition azotée compris entre 500 et 1 000) ou en excès modéré (indice de nutrition azotée compris entre 1 000 et 1 600) par rapport aux besoins de la plante. Enfin, dans le seul cas de figure où l'objectif d'infestation est atteint alors que les plantes-banques sont « inopérantes », la teneur en nitrates dans le feuillage est optimale par rapport aux besoins de la plante. A contrario, dans tous les cas de figure où les plantes-banques sont « inopérantes » et où la teneur en nitrates dans le feuillage est légèrement en excès ou en excès modéré par rapport aux besoins de la plante, l'objectif d'infestation n'est pas atteint.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent par ailleurs que l'indice d'infestation est corrélé négativement avec l'indice de précocité (Figure 3 ; $R^2 = 0,36$) et avec l'indice de nutrition azotée (Figure 4 ; $R^2 = 0,69$). Il est possible que la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes ait un effet sur le niveau d'infestation des cultures par les pucerons en influençant directement la croissance des populations de pucerons d'une part et en modifiant la réponse fonctionnelle des prédateurs de pucerons d'autre part (cette réponse serait d'autant plus efficace que l'indice

FIGURE 3 : Relation entre l'indice d'infestation et l'indice de précocité

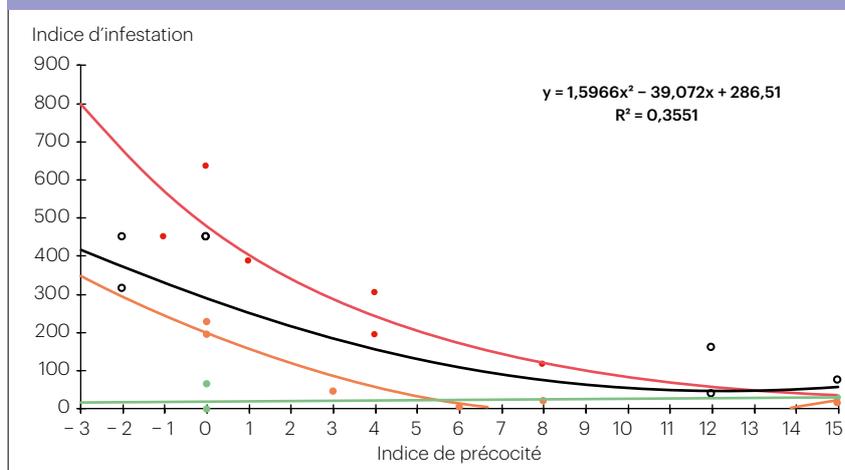
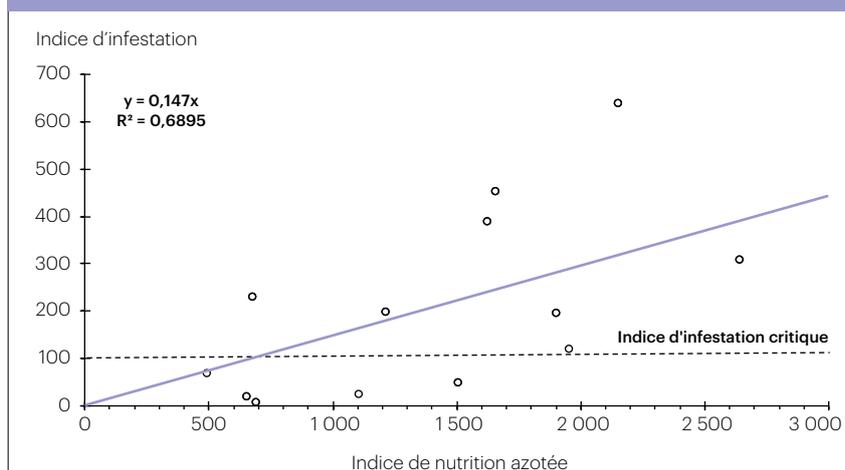


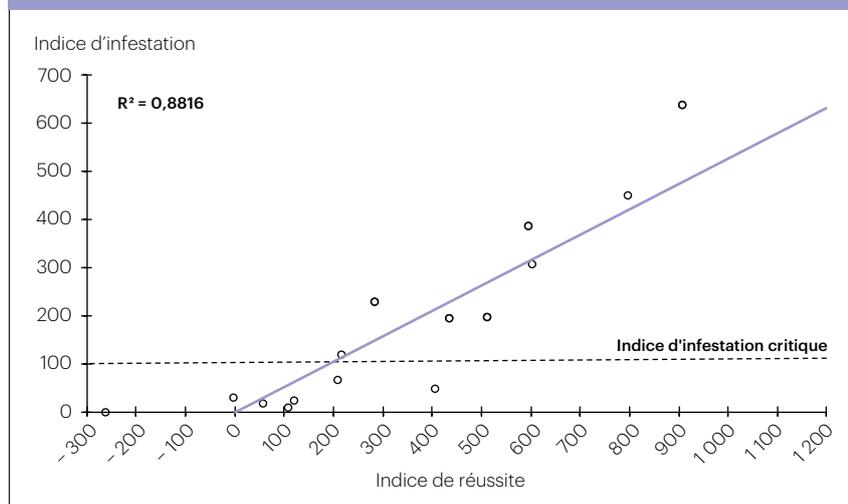
FIGURE 4 : Relation entre l'indice d'infestation et l'indice de nutrition azotée



de nutrition azoté est proche de zéro). Les résultats obtenus suggèrent que plus l'indice de précocité est fort (c'est-à-dire supérieur à 4) et plus l'indice de nutrition est faible (c'est-à-dire proche de zéro), plus les chances de réussite de la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre sont élevées. Lorsque la nutrition azotée des plantes est optimale (indice de nutrition azotée < 500), il semble ainsi que les populations de pucerons peuvent être régulées efficacement (indice d'infestation < 100), que les plantes-banques soient opérantes ou non (c'est-à-dire quelle que soit la valeur de l'indice de précocité). Lorsque la nutrition azotée de la plante est maîtrisée (indice de nutrition azotée compris entre 500 et 1 600), il semble que les populations de pucerons puissent également être régulées efficacement, mais seulement à condition que les plantes-banques soient « opérantes »,

avec un indice de précocité de 4 à minima, de 8 idéalement. Lorsque la nutrition azotée de la plante est excessive (indice de nutrition azotée > 1 600), il semble que les populations de pucerons puissent être régulées difficilement (indice d'infestation > 100), même si les plantes-banques sont « opérantes » (dans ces conditions, l'indice de précocité devrait être de 10 à minima pour espérer une bonne efficacité de la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre). La réussite d'une stratégie de lutte biologique par conservation serait ainsi la résultante de la dynamique de colonisation des plantes-banques par les pucerons servant de proie de substitution, de la structure des communautés de prédateurs de pucerons présentes dans le système de culture et du statut azoté de la plante cultivée. Cette réussite dépendrait par conséquent du choix des plantes

FIGURE 5 : Relation entre l'indice d'infestation et l'indice de réussite



de service implantées dans la parcelle de culture, de leur pérennité et de leur mode de conduite (qui déterminent en partie l'indice de précocité), du cortège de prédateurs de pucerons associé à ces plantes de service (dont dépend le type de réponse fonctionnelle qui s'exprime de façon majoritaire dans le système de culture) et de la façon dont la fertilisation azotée est pilotée (qui exerce un effet à la fois sur la croissance des populations de pucerons et sur le type de réponse fonctionnelle adopté par les prédateurs de pucerons).

Pour déterminer les chances de réussite d'une stratégie de lutte biologique par conservation contre les pucerons à par-

tir des données liées à la dynamique de colonisation des plantes-banques par les pucerons servant de proie de substitution et à la nutrition azotée de la plante cultivée, un indice de réussite a été élaboré dans cette étude. Cet indice est calculé en effectuant le produit des équations associées aux droites de régression des fonctions indice d'infestation = f(indice de précocité) et indice d'infestation = f(indice de nutrition azotée) et est très bien corrélé avec l'indice d'infestation (Figure 5 ; $R^2 = 0,88$). Un indice de réussite inférieur à 220 indique que la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre a toutes les chances d'être efficace pour réguler les populations de pucerons (main-

tien de l'indice d'infestation en deçà de 100) et qu'il n'est pas nécessaire d'intervenir malgré la présence de pucerons sur la plante cultivée ; un indice de réussite compris entre 221 et 450 indique que la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre est insuffisante à elle seule pour réguler efficacement les populations de pucerons (l'indice d'infestation oscille entre 100 et 200) et qu'une intervention complémentaire avec un produit de biocontrôle est nécessaire ; un indice de réussite supérieur à 450 indique que la stratégie de lutte biologique par conservation mise en œuvre n'a aucune chance de réguler efficacement les populations de pucerons (l'indice d'infestation est supérieur à 200) et qu'un autre levier de régulation doit absolument être actionné (utilisation de produits de biocontrôle ou de produits phytosanitaires de synthèse). À terme, l'indice de réussite élaboré dans cette étude pourrait être utilisé par les producteurs pour piloter leur système de culture de façon à maximiser les chances de réussite des stratégies de lutte biologique par conservation qu'ils mettent en œuvre. Dans cette optique, un abaque permettant d'estimer l'indice de réussite en fonction de l'indice de précocité et de l'indice de nutrition azotée mesurés sur le terrain a été construit (Figure 6). Cet abaque, qui n'est pas utilisable en l'état, doit être testé et validé dans le cadre d'études complémentaires. ■

CE QU'IL FAUT RETENIR

Les travaux menés dans cette étude ont permis de mettre au point et d'évaluer une stratégie de lutte biologique par conservation pour protéger efficacement les cultures d'aubergine contre les pucerons. Désormais, une sélection de plantes-ressources et de plantes-banques pertinentes peut être proposée aux producteurs et des conseils sur la façon de les agencer dans l'espace et dans le temps peuvent être promulgués. Néanmoins, certaines conditions doivent être respectées pour garantir l'efficacité des processus de régulation naturelle et éviter que le niveau d'infestation des plantes par les pucerons ne dépasse le seuil de nuisibilité économique. Parmi celles-ci, le maintien d'une teneur en nitrates dans le feuillage en deçà d'une teneur en nitrates critique, tout comme l'arrivée précoce des pucerons sur les plantes-banques, semblent primordiales. L'identification des facteurs biologiques, physiologiques, écologiques et/ou abiotiques qui influencent l'efficacité des stratégies de lutte biologique mises en œuvre dans les cultures légumières pourra constituer l'objectif de projets ultérieurs. Le protocole des expérimentations mises en œuvre en 2017, 2018 et 2019 ainsi que les résultats obtenus sont détaillés dans le rapport « Mise au point et évaluation d'une stratégie de protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques » disponible sur demande.

BIBLIOGRAPHIE

Aqueel, M.A., Collins, C.M., Raza, A.M., Ahmad, S., Tariq, M., Leather, S.R. (2014). Effect of plant nutrition on aphid size, prey consumptions, and life history characteristics of green lacewing. *Insect Sci.* 21, 74-82.

Hosseini, A., Hosseini, M., Michaud, J.P., Awal, M.M., Ghadamyari, M. (2019). Life history responses of *Hippodamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae) to changes in the nutritional content of its prey, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), mediated by nitrogen fertilization. *Biol. Control* 130, 27-33.

Hosseini, A., Hosseini, M., Michaud, J.P., Awal, M.M., Ghadamyari, M. (2018). Nitrogen Fertilization Increases the Nutritional Quality of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) as Prey for *Hippodamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae) and Alters Predator Foraging Behavior. *J. Econ. Entomol.* 111, 2059-2068.

Picault S. (2021). Une nouvelle approche pour évaluer les stratégies de lutte biologique par conservation. *INFOS-CTIFL n°373*, p.50-61.

FIGURE 6 : Proposition d'abaque permettant de déterminer l'indice de réussite en fonction de l'indice de précocité et de l'indice de nutrition azotée

| IN | IP | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 42 | 37 | 32 | 27 | 23 | 19 | 16 | 13 | 11 | 9 | 8 | 7 | 7 | 7 |
| 200 | 84 | 73 | 63 | 54 | 46 | 39 | 32 | 27 | 22 | 19 | 16 | 15 | 14 | 14 |
| 300 | 126 | 110 | 95 | 81 | 69 | 58 | 48 | 40 | 34 | 28 | 24 | 22 | 21 | 21 |
| 400 | 168 | 146 | 126 | 108 | 92 | 77 | 64 | 54 | 45 | 38 | 33 | 29 | 28 | 28 |
| 500 | 211 | 183 | 158 | 135 | 114 | 96 | 81 | 67 | 56 | 47 | 41 | 37 | 35 | 35 |
| 600 | 253 | 220 | 189 | 162 | 137 | 116 | 97 | 80 | 67 | 57 | 49 | 44 | 42 | 42 |
| 700 | 295 | 256 | 221 | 189 | 160 | 135 | 113 | 94 | 78 | 66 | 57 | 51 | 49 | 49 |
| 800 | 337 | 293 | 253 | 216 | 183 | 154 | 129 | 107 | 90 | 75 | 65 | 59 | 56 | 56 |
| 900 | 379 | 329 | 284 | 243 | 206 | 173 | 145 | 121 | 101 | 85 | 73 | 66 | 63 | 63 |
| 1 000 | 421 | 366 | 316 | 270 | 229 | 193 | 161 | 134 | 112 | 94 | 82 | 73 | 70 | 70 |
| 1 100 | 463 | 403 | 347 | 297 | 252 | 212 | 177 | 148 | 123 | 104 | 90 | 81 | 77 | 77 |
| 1 200 | 505 | 439 | 379 | 324 | 275 | 231 | 193 | 161 | 134 | 113 | 98 | 88 | 84 | 84 |
| 1 300 | 548 | 476 | 410 | 351 | 298 | 250 | 209 | 174 | 145 | 123 | 106 | 95 | 91 | 91 |
| 1 400 | 590 | 513 | 442 | 378 | 321 | 270 | 225 | 188 | 157 | 132 | 114 | 103 | 98 | 98 |
| 1 500 | 632 | 549 | 474 | 405 | 343 | 289 | 242 | 201 | 168 | 142 | 122 | 110 | 105 | 105 |
| 1 600 | 674 | 586 | 505 | 432 | 366 | 308 | 258 | 215 | 179 | 151 | 130 | 117 | 112 | 112 |
| 1 700 | 716 | 622 | 537 | 459 | 389 | 328 | 274 | 228 | 190 | 160 | 139 | 125 | 119 | 119 |
| 1 800 | 758 | 659 | 568 | 486 | 412 | 347 | 290 | 241 | 201 | 170 | 147 | 132 | 126 | 126 |
| 1 900 | 800 | 696 | 600 | 513 | 435 | 366 | 306 | 255 | 213 | 179 | 155 | 139 | 133 | 133 |
| 2 000 | 842 | 732 | 631 | 540 | 458 | 385 | 322 | 268 | 224 | 189 | 163 | 147 | 140 | 140 |
| 2 100 | 884 | 769 | 663 | 567 | 481 | 405 | 338 | 282 | 235 | 198 | 171 | 154 | 147 | 147 |
| 2 200 | 927 | 805 | 695 | 594 | 504 | 424 | 354 | 295 | 246 | 208 | 179 | 161 | 154 | 154 |
| 2 300 | 969 | 842 | 726 | 621 | 527 | 443 | 370 | 308 | 257 | 217 | 187 | 169 | 161 | 161 |
| 2 400 | 1 011 | 879 | 758 | 648 | 550 | 462 | 387 | 322 | 269 | 226 | 196 | 176 | 168 | 168 |
| 2 500 | 1 053 | 915 | 789 | 675 | 572 | 482 | 403 | 335 | 280 | 236 | 204 | 183 | 175 | 175 |
| 2 600 | 1 095 | 952 | 821 | 702 | 595 | 501 | 419 | 349 | 291 | 245 | 212 | 191 | 182 | 182 |
| 2 700 | 1 137 | 988 | 852 | 729 | 618 | 520 | 435 | 362 | 302 | 255 | 220 | 198 | 189 | 189 |
| 2 800 | 1 179 | 1 025 | 884 | 756 | 641 | 539 | 451 | 376 | 313 | 264 | 228 | 205 | 196 | 196 |
| 2 900 | 1 221 | 1 062 | 915 | 783 | 664 | 559 | 467 | 389 | 324 | 274 | 236 | 213 | 203 | 203 |
| 3 000 | 1 264 | 1 098 | 947 | 810 | 687 | 578 | 483 | 402 | 336 | 283 | 245 | 220 | 210 | 210 |
| 3 100 | 1 306 | 1 135 | 979 | 837 | 710 | 597 | 499 | 416 | 347 | 292 | 253 | 227 | 217 | 217 |
| 3 200 | 1 348 | 1 171 | 1 010 | 864 | 733 | 617 | 515 | 429 | 358 | 302 | 261 | 235 | 224 | 224 |
| 3 300 | 1 390 | 1 208 | 1 042 | 891 | 756 | 636 | 531 | 443 | 369 | 311 | 269 | 242 | 231 | 231 |
| 3 400 | 1 432 | 1 245 | 1 073 | 918 | 779 | 655 | 548 | 456 | 380 | 321 | 277 | 249 | 238 | 238 |
| 3 500 | 1 474 | 1 281 | 1 105 | 945 | 801 | 674 | 564 | 469 | 392 | 330 | 285 | 257 | 245 | 245 |
| 3 600 | 1 516 | 1 318 | 1 136 | 972 | 824 | 694 | 580 | 483 | 403 | 340 | 293 | 264 | 252 | 252 |
| 3 700 | 1 558 | 1 354 | 1 168 | 999 | 847 | 713 | 596 | 496 | 414 | 349 | 302 | 271 | 259 | 259 |
| 3 800 | 1 600 | 1 391 | 1 200 | 1 026 | 870 | 732 | 612 | 510 | 425 | 359 | 310 | 279 | 266 | 266 |
| 3 900 | 1 643 | 1 428 | 1 231 | 1 053 | 893 | 751 | 628 | 523 | 436 | 368 | 318 | 286 | 273 | 273 |
| 4 000 | 1 685 | 1 464 | 1 263 | 1 080 | 916 | 771 | 644 | 536 | 448 | 377 | 326 | 293 | 280 | 280 |
| 4 100 | 1 727 | 1 501 | 1 294 | 1 107 | 939 | 790 | 660 | 550 | 459 | 387 | 334 | 301 | 287 | 287 |
| 4 200 | 1 769 | 1 538 | 1 326 | 1 134 | 962 | 809 | 676 | 563 | 470 | 396 | 342 | 308 | 294 | 294 |
| 4 300 | 1 811 | 1 574 | 1 357 | 1 161 | 985 | 828 | 693 | 577 | 481 | 406 | 350 | 315 | 301 | 301 |
| 4 400 | 1 853 | 1 611 | 1 389 | 1 188 | 1 008 | 848 | 709 | 590 | 492 | 415 | 359 | 323 | 308 | 308 |
| 4 500 | 1 895 | 1 647 | 1 421 | 1 215 | 1 030 | 867 | 725 | 604 | 504 | 425 | 367 | 330 | 315 | 315 |
| 4 600 | 1 937 | 1 684 | 1 452 | 1 242 | 1 053 | 886 | 741 | 617 | 515 | 434 | 375 | 337 | 322 | 322 |
| 4 700 | 1 979 | 1 721 | 1 484 | 1 269 | 1 076 | 906 | 757 | 630 | 526 | 443 | 383 | 345 | 329 | 329 |
| 4 800 | 2 022 | 1 757 | 1 515 | 1 296 | 1 099 | 925 | 773 | 644 | 537 | 453 | 391 | 352 | 336 | 336 |
| 4 900 | 2 064 | 1 794 | 1 547 | 1 323 | 1 122 | 944 | 789 | 657 | 548 | 462 | 399 | 359 | 343 | 343 |
| 5 000 | 2 106 | 1 830 | 1 578 | 1 350 | 1 145 | 963 | 805 | 671 | 559 | 472 | 408 | 367 | 350 | 350 |
| 5 100 | 2 148 | 1 867 | 1 610 | 1 377 | 1 168 | 983 | 821 | 684 | 571 | 481 | 416 | 374 | 357 | 357 |
| 5 200 | 2 190 | 1 904 | 1 642 | 1 404 | 1 191 | 1 002 | 837 | 697 | 582 | 491 | 424 | 381 | 364 | 364 |
| 5 300 | 2 232 | 1 940 | 1 673 | 1 431 | 1 214 | 1 021 | 854 | 711 | 593 | 500 | 432 | 389 | 371 | 371 |
| 5 400 | 2 274 | 1 977 | 1 705 | 1 458 | 1 236 | 1 040 | 870 | 724 | 604 | 510 | 440 | 396 | 378 | 378 |
| 5 500 | 2 316 | 2 013 | 1 736 | 1 485 | 1 259 | 1 060 | 886 | 738 | 615 | 519 | 448 | 403 | 384 | 384 |
| 5 600 | 2 359 | 2 050 | 1 768 | 1 512 | 1 282 | 1 079 | 902 | 751 | 627 | 528 | 456 | 411 | 391 | 391 |
| 5 700 | 2 401 | 2 087 | 1 799 | 1 539 | 1 305 | 1 098 | 918 | 764 | 638 | 538 | 465 | 418 | 398 | 398 |
| 5 800 | 2 443 | 2 123 | 1 831 | 1 566 | 1 328 | 1 117 | 934 | 778 | 649 | 547 | 473 | 426 | 405 | 405 |