

**RÉSUMÉ**

Une approche originale a été développée par le CTIFL pour évaluer l'efficacité des stratégies de lutte biologique par conservation. Cette approche consiste à décrire les mécanismes biologiques et écologiques à l'œuvre dans le système de culture, puis à les comparer aux mécanismes attendus en théorie. Pour cela, l'évolution des différentes composantes de l'agroécosystème est décrite à travers une série de courbes. Les paramètres de ces courbes sont ensuite extraits pour servir au calcul d'indicateurs systémiques (déconstruction d'une réalité complexe). À partir de ces indicateurs, des diagrammes séquentiels décrivant les processus en jeu dans l'agrosystème sont élaborés (reconstruction d'une réalité simplifiée) et confrontés à des hypothèses de régulation définies au préalable.

**METHODOLOGY FOR  
AGROECOLOGY: A NEW  
APPROACH TO EVALUATE  
CONSERVATION BIOLOGICAL  
CONTROL STRATEGIES**

An original approach has been developed by the CTIFL to evaluate the efficacy of conservation biological control strategies. This approach consists in describing the biological and ecological mechanisms at work in the cropping system, and then comparing them to the mechanisms expected in theory. For this purpose, the evolution of the different components of the agroecosystem is described through a series of curves. The parameters of these curves are then extracted and used to calculate systemic indicators (deconstruction of a complex reality). From these indicators, sequential diagrams describing the processes at play in the agrosystem are elaborated (reconstruction of a simplified reality) and compared with previously defined regulation hypotheses.

**MÉTHODOLOGIES POUR L'AGROÉCOLOGIE****UNE NOUVELLE APPROCHE  
POUR ÉVALUER LES STRATÉGIES  
DE LUTTE BIOLOGIQUE  
PAR CONSERVATION**

*Afin de protéger les cultures légumières contre les pucerons en limitant le recours aux produits phytosanitaires de synthèse, des stratégies de lutte biologique par conservation sont mises au point. Pour évaluer l'efficacité de ces stratégies, une méthodologie originale reposant sur l'étude des mécanismes biologiques et écologiques en jeu dans l'agroécosystème a été développée par le CTIFL.*



> EXEMPLE DE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL MIS EN PLACE POUR ÉVALUER L'EFFET D'UNE STRATÉGIE DE LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION EN CULTURES LÉGUMIÈRES

## PROTECTION DES CULTURES LÉGUMIÈRES CONTRE LES PUCERONS

Face à la réduction des solutions chimiques disponibles pour limiter les pullulations de pucerons dans les cultures légumières et à la demande croissante de fruits et légumes exempts de traitements phytosanitaires, des solutions de protection alternatives doivent être mises au point. Différentes voies alternatives ont été ou sont explorées, à commencer par la recherche de variétés résistantes. Cependant, cette voie a rarement permis d'aboutir à des solutions opérationnelles, la sélection de plantes pour la résistance aux insectes étant difficile en raison de l'absence de systèmes génétiques de résistances simples. Néanmoins, des gènes de résistance aux pucerons ont pu être sélectionnés chez certaines plantes telles que le melon (gène Vat de résistance à la colonisation par *Aphis gossypii*) et la laitue (gène Nr de résistance à *Nasonovia ribisnigri*). Malgré l'observation de quelques phénomènes de contournements, le niveau de résistance conféré par ces deux gènes a été jugé acceptable et s'est révélé stable dans le temps. Pour protéger leurs cultures contre les pucerons, les producteurs de légumes peuvent aussi utiliser des produits de biocontrôle à base d'extraits végétaux ou de savon noir, mais les traitements

avec ces produits doivent souvent être répétés pour être efficaces et peuvent s'avérer coûteux. Le principal facteur de régulation des populations aphidiennes demeure finalement l'action de contrôle biologique exercée par les ennemis naturels de pucerons (arthropodes prédateurs et/ou parasitoïdes). Cependant, si les connaissances sur ce contrôle biologique sont nombreuses et que des méthodes de lutte biologique inondatives sont proposées depuis longtemps, celles-ci se heurtent à de nombreux verrous techniques parfois difficiles à lever (problèmes de spécificités d'hôtes et/ou d'acclimatation des arthropodes prédateurs et/ou parasitoïdes notamment). Pour exploiter au mieux le potentiel de la grande diversité des ennemis naturels de pucerons et lever ces verrous, de nouvelles stratégies de protection sont développées, telles que les stratégies de lutte biologique par conservation, basées sur l'utilisation de plantes-ressources et de plantes-banques. Dans ces stratégies, la fonction des plantes-ressources est d'attirer les principaux prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons naturellement présents dans l'environnement (syrphes, coccinelles, chrysopes, cécidomyies prédatrices du genre *Aphidoletes*, punaises prédatrices de la famille des *Miridae*, punaises prédatrices du genre *Orius*, micro-hyménoptères parasitoïdes...) en fournissant aux individus adultes les ressources énergétiques (sucres contenus

dans les nectars floraux et/ou extra-floraux) et les ressources protéiques (pollen) nécessaires à la production des œufs. La fonction des plantes-banques est quant à elle de favoriser, le plus tôt possible, les pontes de prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons dans la culture, en hébergeant des pucerons (inoffensifs pour la plante cultivée) pouvant servir de proie ou d'hôte de substitution aux larves issues des œufs en attendant que les premiers pucerons arrivent sur la plante cultivée. La plupart des prédateurs de pucerons ne pondent en effet leurs œufs qu'à proximité de foyers de pucerons pouvant servir de nourriture aux larves qui sortent de ces œufs.

## ÉVALUER LES STRATÉGIES DE LUTTE BIOLOGIQUE PAR CONSERVATION

### APPROCHES « FACTORIELLES »

Ces dernières années, des stratégies de lutte biologique par conservation ont été mises au point et évaluées par le CTIFL et ses partenaires, dans le cadre de plusieurs projets soutenus par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation – CASDAR (ex. : projet AGATH porté par le CTIFL de 2013 à 2015 ; projet MUSCARI porté par le GRAB de 2015 à 2018), les conseils régionaux (ex. : projet AGREABLE porté par l'ARELPAL de 2014 à 2016 et soutenu par le conseil régional des Pays de la Loire) ou encore l'Office français pour la biodiversité – OFB (ex. : projet AGRONICOLEG porté par le CATE de 2016 à 2018). Dans ces projets, les stratégies testées ont été évaluées (i) soit avec une méthode que l'on pourrait qualifier de « méthode des binômes », (ii) soit avec une méthode que l'on pourrait qualifier de « méthode des gradients ». Ces méthodes relèvent toutes deux d'une approche factorielle, où le facteur étudié est évalué à l'aune d'un témoin non traité ou sur la base de comparaisons de moyenne. La méthode des binômes consiste à comparer des variables biologiques (activité des populations de prédateurs et/ou parasitoïdes, densité des populations de ravageurs sur le feuillage des plantes...) et agronomiques (niveau d'infestation des plantes par les ravageurs, incidence et/ou sévérité des dégâts...) entre une parcelle



> LARVE DE COCCINELLE SUR UNE FEUILLE D'ASCLÉPIAS

aménagée avec des plantes-ressources et/ou des plantes-banques et une parcelle témoin (parcelles sans plantes-ressources ni plantes-banques), les deux parcelles se trouvant au sein d'une unité paysagère homogène. La méthode des gradients consiste à comparer, le long d'un transect imaginaire traversant une seule et unique parcelle, ces mêmes variables biologiques et agronomiques entre des stations d'observation situées à proximité directe des plantes-ressources et/ou des plantes-banques et des stations d'observation plus éloignées.

Ces méthodes ont montré tout leur intérêt pour évaluer l'efficacité d'une stratégie de lutte biologique par conservation. Néanmoins, elles présentent l'une comme l'autre certaines limites. Avec la méthode des binômes, il est ainsi souvent difficile d'avoir de véritables parcelles témoins. En effet, au sein d'un même binôme, la stratégie de lutte biologique mise en œuvre dans la parcelle aménagée est susceptible d'influencer la parcelle témoin dans le cas où les deux parcelles sont relativement proches l'une de l'autre et/ou que l'aire de dispersion et/ou de prospection des prédateurs et/ou parasitoïdes attirés par les plantes-ressources et/ou les plantes-banques est grande. Ainsi, l'existence d'une différence systématique entre la parcelle aménagée et la parcelle témoin des binômes étudiés peut effectivement être considérée comme le signe d'un effet significatif de la stratégie de lutte biologique sur les processus de régulation naturelle. A contrario, l'absence de différences entre la parcelle aménagée et la parcelle témoin des binômes étudiés ne permet pas de conclure quant à l'effet de la stratégie de lutte biologique sur les processus de régulation naturelle. Ce cas de figure peut en effet se rencontrer lorsque la stratégie de lutte biologique n'a aucun effet significatif sur les processus de régulation naturelle (hypothèse neutre), mais aussi lorsque cet effet est significatif et qu'il s'exerce à une échelle très large. Éloigner les parcelles aménagée et témoin l'une de l'autre pour éviter ce biais est envisageable, mais cela n'est pas toujours pertinent dans la mesure où plus les deux parcelles d'un même binôme sont éloignées, plus le risque de dégrader l'homogénéité paysagère du dispositif ex-

périmental, et donc d'introduire des biais expérimentaux supplémentaires, est fort. La méthode des gradients repose quant à elle sur l'hypothèse selon laquelle le rayon d'action des arthropodes prédateurs et/ou parasitoïdes serait limité et que les processus de régulation naturelle induits par la présence de plantes-ressources et/ou de plantes-banques dans la culture perdraient en intensité au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celles-ci. Par conséquent, l'existence d'un gradient entre les stations d'observation les plus proches des plantes-ressources et/ou des plantes-banques et les stations les plus éloignées serait le signe d'un effet significatif de la stratégie de lutte biologique sur les processus de régulation naturelle. L'utilisation de cette méthode peut être biaisée dans le cas où le rayon d'action des prédateurs et/ou parasitoïdes attirés par les plantes-ressources et/ou de plantes-banques est en réalité très large et/ou plutôt déterminé par la localisation de la ressource que par le rapport entre une capacité physique et une distance à parcourir. Par ailleurs, l'existence de gradients du bord des cultures vers les zones plus centrales est souvent observée quelle que soit la nature des abords parcellaires (Picault, 2013). Enfin, les deux méthodes reposent sur le postulat de départ selon lequel les plantes-ressources et/ou les plantes-banques exercent pleinement leur fon-

ction du simple fait de leur présence dans le système de culture, et que l'efficacité des stratégies de lutte biologique mises en œuvre dépend essentiellement du niveau d'activité des prédateurs et/ou parasitoïdes dans la culture. Or, les plantes-ressources et les plantes-banques ne peuvent exercer leur fonction que si un certain nombre de mécanismes écologiques sont effectivement enclenchés d'une part, et que si les différentes composantes du système agrobiologiques sont synchrones d'autre part. Dans l'élaboration et l'évaluation d'une stratégie de lutte biologique par conservation, l'objectif ne serait donc pas tant d'augmenter massivement et sans discernement le niveau d'activité des populations de prédateurs et/ou de parasitoïdes dans les cultures que de veiller à enclencher des mécanismes écologiques clefs et à respecter certains synchronismes (le niveau d'activité des prédateurs et/parasitoïdes étant souvent proie-dépendant, un très fort niveau d'activité de ces derniers dans les cultures pourrait d'ailleurs être considéré comme le signe d'un échec plutôt que d'un succès...). Plus que chercher à maîtriser la nature pour atteindre des objectifs purement quantitatifs, l'idée serait plutôt de canaliser les processus biologiques et écologiques sous-jacents pour garder, en permanence, un temps d'avance sur celle-ci.



> TUNNEL D'AUBERGINE « TÉMOIN »



> LARVES DE SYRPHÉ ET DE COCCINELLE SUR UNE FEUILLE DE TANAISIE

#### APPROCHE « MÉCANISTE »

Afin d'évaluer les stratégies de lutte biologique par conservation mises au point pour protéger les cultures légumières contre les pucerons en limitant les biais inhérents à la méthode des binômes et à la méthode des gradients, une approche « mécaniste » a été développée dans le cadre du projet REGULEG, porté par le CTIFL de 2018 à 2020 et soutenu par l'Office français pour la biodiversité (OFB). Cette approche consiste à décrire les mécanismes biologiques et écologiques réellement en œuvre dans le système de culture, puis à les comparer aux mécanismes biologiques et écologiques attendus en théorie. Dans cette approche, la description des mécanismes à l'œuvre dans la culture se fait à l'aide de variables écologiques (dates de début et de fin de floraison des plantes-ressources, durée de floraison des plantes-ressources, niveau d'activité des prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons sur les plantes-ressources, niveau d'activité des prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons sur les plantes-banques, délai entre l'arrivée des pucerons sur la plante cultivée et l'arrivée des pucerons sur les plantes-banques, délai entre l'arrivée des prédateurs et celle des pucerons sur les plantes-banques, couples proie-prédateur en jeu...), de variables biologiques (niveau d'infestation des plantes-banques et des plantes cultivées par les pucerons, niveau d'acti-

tivité des prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons sur les plantes cultivées...) et de variables agronomiques (état physiologique de la plante cultivée, rendement brut de la culture, proportion de fruits ou de légumes commercialisables, pourcentage de déchets...) suivies tout au long de la période expérimentale. En fin d'expérimentation, un bilan agronomique est effectué afin de déterminer si la stratégie de lutte biologique mise en œuvre se caractérise par un échec ou un succès. Les situations pour lesquelles les mécanismes biologiques et écologiques ne se sont pas enclenchés conformément à ce qui était attendu en théorie et pour lesquelles un échec de la stratégie de lutte biologique mise en œuvre a été constaté sont identifiées, tout comme celles pour lesquelles les mécanismes biologiques et écologiques se sont enclenchés conformément à ce qui était attendu en théorie, et pour lesquelles un succès de la stratégie de lutte biologique mise en œuvre a été constaté.

#### L'APPROCHE « MÉCANISTE » APPLIQUÉE AUX CULTURES D'AUBERGINE SOUS ABRI FROID

L'approche « mécaniste » développée dans le projet REGULEG a été adoptée dans une étude menée par le CTIFL pour évaluer l'efficacité d'une stratégie de lutte bio-

logique par conservation mise au point pour protéger les cultures d'aubergine contre les pucerons (Picault, 2021). 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 la stratégie testée, les plantes-ressources et les plantes-banques ont été choisies à dire d'experts d'une part (connaissances et observations empiriques des producteurs de légumes et des conseillers techniques), et sur la base de travaux antérieurs menés par le CTIFL d'autre part (Picault, 2017). Les plantes-ressources utilisées étaient la tansie (*Tanacetum vulgare*), l'achillée millefeuille (*Achilleum millefolium*), le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*), l'amarante queue-de-renard (*Amaranthus caudatus*), le souci officinal (*Calendula officinalis*), la corbeille d'or (*Alyssum saxatile*), l'asclépias (*Asclepias tuberosa*) et la coriandre (*Coriandrum sativum*). Les plantes-banques utilisées étaient le blé (*Triticum* sp.), l'asclépias (*Asclepias tuberosa*), la tansie (*Tanacetum vulgare*), l'achillée millefeuille (*Achilleum millefolium*), et/ou l'ortie (*Urtica* sp.).

L'efficacité de la stratégie de lutte biologique testée a été évaluée 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 à deux périodes d'infestation des plantes par les pucerons peuvent être observées en culture d'aubergine sous abri froid), la stratégie de protection a été considérée comme efficace si l'indice d'infestation était inférieur à 100 (objectif d'infestation). A contrario, cette stratégie a été jugée inefficace si cet indice était supérieur à 100.

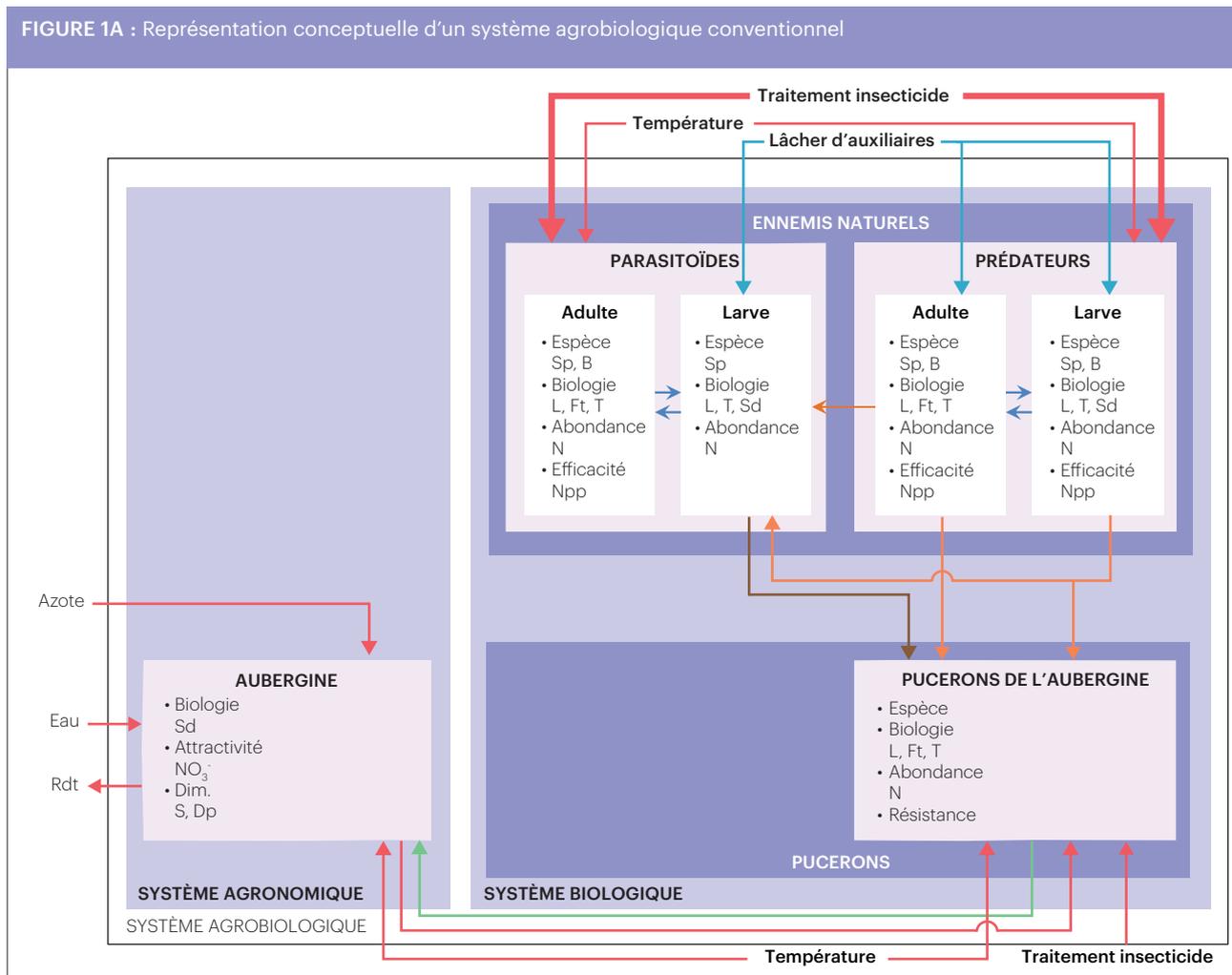
#### SYSTÈME CONVENTIONNEL VERSUS SYSTÈME ALTERNATIF

Dans l'étude menée par le CTIFL, il a été considéré qu'un système de culture d'aubergine sous abri froid était constitué d'une composante physico-chimique (sol), d'une composante agronomique

(plantes cultivées) et d'une composante biologique (ravageurs et auxiliaires des cultures). Dans un système de culture conventionnel, la composante agronomique est représentée par la seule culture d'aubergine (Figure 1A). La composante biologique englobe quant à elle (i) les populations de pucerons s'attaquant à l'aubergine, (ii) les populations de prédateurs de pucerons, (iii) les populations de parasitoïdes de pucerons, et (iv) les populations de pollinisateurs. Dans ce genre de système, les pucerons s'atta-

quant à l'aubergine sont gérés à l'aide de produits phytosanitaires et/ou de produits alternatifs (traitements insecticides) ainsi que par des lâchers de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons effectués en complément (stratégie de protection intégrée - PBI). Les produits phytosanitaires et/ou alternatifs exercent une action directe sur les populations de pucerons, tandis que les lâchers de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons exercent une action indirecte sur celles-ci, en augmentant les stocks de prédateurs et/ou de

parasitoïdes de pucerons. Les lâchers de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons sont généralement efficaces pour réguler les pullulations tardives de pucerons (pullulations survenant à partir de la fin du mois de mai) sans avoir recours aux produits phytosanitaires et/ou alternatifs de façon massive. En revanche, ils peuvent être insuffisants pour réguler les pullulations de pucerons les plus précoces (pullulations survenant en avril, qui sont souvent les plus désastreuses pour la production). Au moment où ces pullulations



i.e. : gestion des pucerons à l'aide de produits phytosanitaires de synthèse et/ou de produits alternatifs ; A) et alternatif (i.e. : gestion des pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques ; B). En violet : composantes et sous-composantes (la sous-composante « pollinisateurs » n'apparaît pas par souci de simplification). Les flèches représentent les flux entre composantes et sous-composantes : rouge : « agit sur » ; orange : « prédation » ; marron : parasitisme ; vert : « phytophagie » ; bleu : « génère ». Les paramètres et variables d'état sont représentés sous forme de lettres à l'intérieur de chaque composante et sous-composante. B : type de pièce buccale ; C : composition ; Co : couleur ; COV : composés organiques volatils ; D : disponibilité ; Dim. : dimensionnement ; DF : durée de floraison ; Dp : densité de plantation ; Ds : densité de semis ; E : espèce ; Ft : fertilité ; L : longévité ; N : nombre ; Nectar EF : nectar extra-floral ; Nectar F : nectar floral ; NO<sub>3</sub> : teneur en nitrates ; Npp : nombre potentiel de proies ; PB : plante-banque ; Pf : profondeur ; PF : période de floraison ; PR : plante-ressource ; Q : quantité ; Résistance : résistance aux insecticides ; S : surface ; Sd : stade ; Sp : niveau de spécificité ; T : température optimale

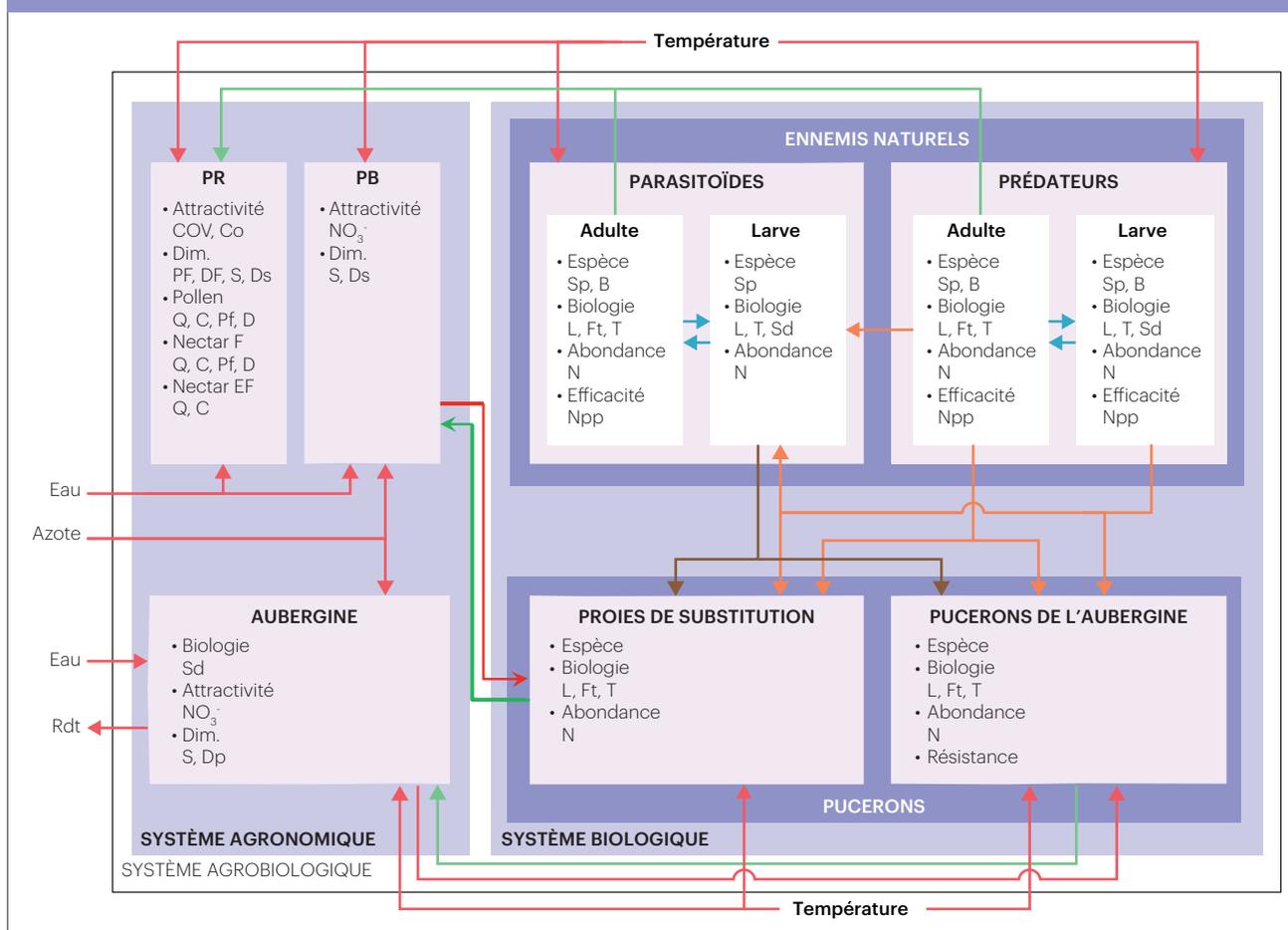
sont observées, les températures sont souvent trop froides pour que les prédateurs et/ou parasitoïdes lâchés dans les abris puissent s'y acclimater rapidement, et il n'y a pas, dans les abris, les ressources nécessaires à l'installation pérenne de leurs populations. Les producteurs n'ont alors d'autre choix que d'augmenter le recours aux produits phytosanitaires et/ou alternatifs, ce qui peut avoir un effet délétère sur le stock de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons et in fine un impact négatif sur les processus de régulation biologique à plus ou moins long

terme (atrophisation des flux de prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons dans l'agrosystème).

Pour gérer les pullulations de pucerons les plus précoces en amplifiant les flux de prédateurs et/ou de parasitoïdes de pucerons dans l'agrosystème plutôt qu'en recourant aux produits phytosanitaires et/ou alternatifs, le système de culture conventionnel doit être complexifié. Dans l'étude menée par le CTIFL, un système de culture complexe, dit système de culture alternatif, a ainsi été mis au point dans le but d'attirer très tôt les prédateurs et/ou

parasitoïdes de pucerons déjà présents dans l'environnement des cultures, et donc déjà acclimatés aux conditions de production contrairement aux prédateurs et/ou parasitoïdes lâchés dans les abris après avoir été élevés en conditions contrôlées. Dans ce système de culture, la composante agronomique est constituée (i) de la culture d'aubergine, (ii) de patchs de plantes-ressources et (iii) de patchs de plantes-banques (Figure 1B). La composante biologique englobe quant à elle (i) les populations de pucerons s'attaquant à l'aubergine, (ii) les populations de puce-

FIGURE 1B : Représentation conceptuelle d'un système agrobiologique alternatif



i.e. : gestion des pucerons à l'aide de produits phytosanitaires de synthèse et/ou de produits alternatifs ; A) et alternatif (i.e. : gestion des pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques ; B). En violet : composantes et sous-composantes (la sous-composante « pollinisateurs » n'apparaît pas par souci de simplification). Les flèches représentent les flux entre composantes et sous-composantes : rouge : « agit sur » ; orange : « prédation » ; marron : parasitisme ; vert : « phytophagie » ; bleu : « genre ». Les paramètres et variables d'état sont représentés sous forme de lettres à l'intérieur de chaque composante et sous-composante. B : type de pièce buccale ; C : composition ; Co : couleur ; COV : composés organiques volatils ; D : disponibilité ; Dim. : dimensionnement ; DF : durée de floraison ; Dp : densité de plantation ; Ds : densité de semis ; E : espèce ; Ft : fertilité ; L : longévité ; N : nombre ; Nectar EF : nectar extra-floral ; Nectar F : nectar floral ; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : teneur en nitrates ; Npp : nombre potentiel de proies ; PB : plante-banque ; Pf : profondeur ; PF : période de floraison ; Dp : densité de plantation ; Ds : densité de semis ; E : espèce ; S : surface ; Sd : stade ; Sp : niveau de spécificité ; T : température optimale

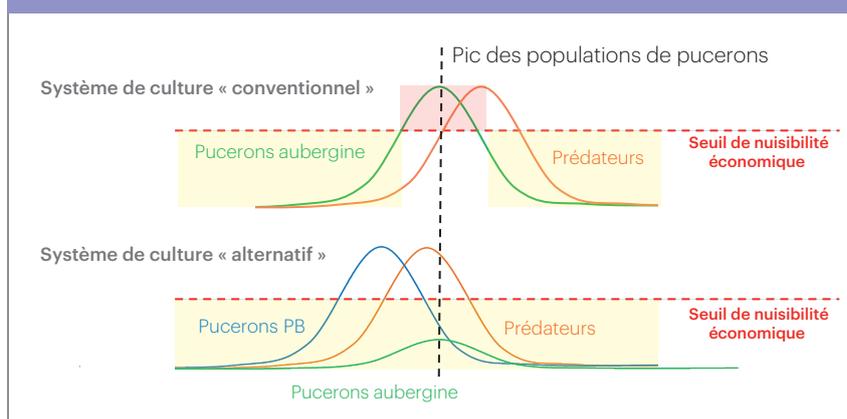
rons hébergés par les plantes-banques et servant de proies de substitution, (iii) les populations de prédateurs de pucerons, (iv) les populations de parasitoïdes de pucerons, et (v) les populations de pollinisateurs. Dans ce genre de système, les pucerons s'attaquant à l'aubergine sont gérés exclusivement par les prédateurs et/ou parasitoïdes de pucerons présents dans l'environnement des cultures en activant un système de flux biologiques interactifs.

**ORIENTER L'ORDRE NATUREL DES CHOSSES VERS UN OBJECTIF DE PRODUCTION**

**Hypothèse de régulation pour un système de culture conventionnel**

Dans le système de culture conventionnel, il est attendu que les premiers pucerons s'attaquant à l'aubergine s'installent sur le feuillage des plantes à un moment où les prédateurs de pucerons ne sont pas encore présents dans les abris (Figure 2). Leurs populations se mettraient ensuite à croître, d'abord lentement, puis de façon exponentielle au fur et à mesure que la plante grandit (c'est-à-dire au fur et à mesure que la ressource s'accroît). L'accroissement des populations de pucerons jusqu'à une taille critique rendrait les pucerons attractifs pour les prédateurs de pucerons (phénomène de densité-dépendance), dont les populations se mettraient à croître à leur tour au fur et à mesure que

**FIGURE 2 : Hypothèses de régulation des populations de pucerons dans une culture d'aubergine pour un système de culture conventionnel et un système de culture alternatif**



PB : plantes-banques

la ressource s'accroît (c'est-à-dire au fur et à mesure que les populations de pucerons continuent à grandir). Sous l'action des prédateurs de pucerons (mais aussi parce que la plante, qui constitue une ressource pour les pucerons, s'épuise), les populations de pucerons verraient leur croissance ralentir avant d'entamer une phase de décroissance et de s'éteindre finalement complètement. Les populations de pucerons déclinant au fil du temps, les populations de prédateurs de pucerons se mettraient, elles aussi, à décliner (elles décroissent au fur et à mesure que les ressources s'amenuisent) jusqu'à s'éteindre complètement à leur tour. Ce mécanisme

naturel (loi de Lotka-Volterra) est intéressant dans la mesure où il permet de réguler les populations de pucerons dans les cultures d'aubergines sans avoir besoin d'utiliser des produits phytosanitaires. Cependant, l'action des prédateurs de pucerons est souvent trop tardive et ne permet pas, la plupart du temps, de maintenir la taille des populations de pucerons en deçà du seuil de nuisibilité économique. Dans l'étude menée par le CTIFL, il était attendu que toute stratégie de lutte biologique par conservation aboutisse à un échec (i.e. indice d'infestation > 100) dans tous les cas de figure où l'hypothèse de régulation pour un système de culture conventionnel est vérifiée.



> PUCERONS SUR FEUILLE D'AUBERGINE

**Hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif**

Pour maintenir les populations de pucerons s'attaquant à l'aubergine en deçà du seuil de nuisibilité économique, il faudrait que les populations de prédateurs de pucerons entrent en phase de croissance exponentielle avant l'arrivée des premiers pucerons sur le feuillage des aubergines, c'est-à-dire qu'il faudrait inverser l'ordre naturel des choses. C'est ce phénomène qui est attendu dans le système de culture alternatif. Dans ce système, il est attendu que les premiers pucerons devant servir de proie de substitution s'installent très tôt sur le feuillage des plantes-banques, à un moment où les prédateurs de pucerons d'une part, et les pucerons s'attaquant à l'aubergine d'autre part, ne sont pas

encore présents dans les abris (Figure 2). Leurs populations se mettraient ensuite à croître, d'abord lentement, puis de façon exponentielle au fur et à mesure que les plantes-banques grandissent (c'est-à-dire au fur et à mesure que la ressource s'accroît). L'accroissement des populations de pucerons sur les plantes-banques jusqu'à une taille critique rendrait les pucerons attractifs pour les prédateurs de pucerons (phénomène de densité-dépendance), dont les populations se mettraient à croître à leur tour à un moment où les pucerons s'attaquant à l'aubergine ne sont toujours pas arrivés dans les abris. Lorsque les premiers pucerons s'attaquant à l'aubergine commencent à s'installer sur le feuillage des plantes, les populations de prédateurs de pucerons seraient à leur apogée et directement opérationnelles, empêchant alors tout développement des populations de pucerons s'attaquant à l'aubergine au-delà du seuil de nuisibilité économique.

Dans l'étude menée par le CTIFL, il était attendu que toute stratégie de lutte bio-

logique par conservation aboutisse à un succès (i.e. indice d'infestation < 100) soit observé dans tous les cas de figure où l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif est vérifiée.

### COMPARAISON DES PROCESSUS ÉCOLOGIQUES ENTRE DES TUNNELS AMÉNAGÉS ET TÉMOINS

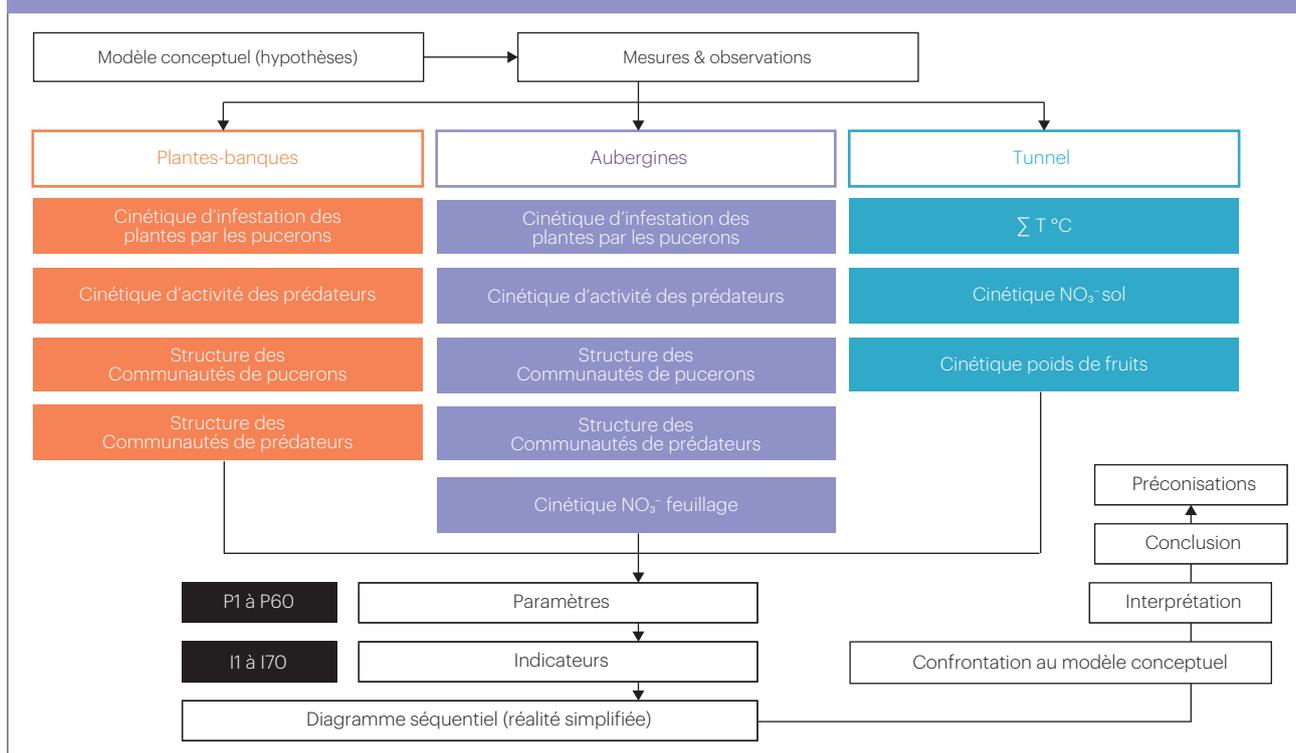
#### UN DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DÉPLOYÉ SUR TROIS ANS

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 réplica par an). Le dispositif expérimental mis en place était 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 de 9 x 50 m chacun, dits tunnels aménagés), et de deux tunnels d'aubergines sans aucune protection contre les pucerons (tunnels T1 & T2 de 9 x 50 m chacun, dits tunnels témoins). Dans les tunnels aménagés, les plantes de service ont été semées ou plantées annuellement sur la planche centrale (patches de 14 m<sup>2</sup> environ) 2 à 3 mois avant la plantation des aubergines, et occupaient environ 20 % de la surface de production. Dans les tunnels témoins, aucune plante de service n'a été implantée et aucun traitement contre les pucerons n'a jamais été effectué, que ce soit avec des produits phytosanitaires et/ou de produits alternatifs. Dans les quatre tunnels, les plants d'aubergine (variété Black gem Gr Emperador certifiée AB ; plants greffés à 4 têtes) ont été plantés en semaine n° 15 ou 16 selon l'année d'étude.

En 2017, 2018 et 2019, les populations de pucerons et de prédateurs de pucerons ont été suivies tout au long de la période expérimentale sur le feuillage des

FIGURE 3 : Démarche de travail pour évaluer l'efficacité d'une stratégie de protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques



**TABLEAU 1 (1/3) : INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES PROCESSUS DE RÉGULATION NATURELLE DANS LES TUNNELS AMÉNAGÉS ET TÉMOINS ÉTUDIÉS. AU TOTAL, 70 INDICATEURS ONT ÉTÉ CALCULÉS DANS LE PROJET REGULEG**

Indicateur	Milieu	Objet	Période	Libellé	
I1	Plantes-banques	Pucerons		Début d'activité prédateurs « PB » - Début de la période d'infestation « PB » (Nb semaines)	
I2				Fréquence de plantes fortement infestées (classe D) au pic d'infestation (%)	
I3				Durée de la période d'infestation (Nb semaines)	
I4				Abondance moyenne sur le blé au pic d'infestation (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)	
I5				Abondance moyenne sur l'asclépias au pic d'infestation (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)	
I6				Abondance moyenne sur l'ortie au pic d'infestation (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)	
I7				Abondance moyenne sur la tanaïsie au pic d'infestation (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)	
I8				Espèce majoritaire sur l'asclépias au pic d'infestation	
I9				Espèce majoritaire sur le blé au pic d'infestation	
I10				Espèce majoritaire sur l'ortie au pic d'infestation	
I11				Espèce majoritaire sur la tanaïsie au pic d'infestation	
I12		Prédateurs			Début activité prédateurs « PB » - Début de la période d'infestation « PB » (Nb semaines)
I13					Croissance exponentielle prédateurs « PB » - Croissance exponentielle infestation « PB » (Nb semaines)
I14					Pic d'activité prédateurs « PB » - Pic d'infestation « PB » (Nb semaines)
I15					Vitesse d'accroissement des populations (Nb individus/semaine)
I16					Point d'inflexion (N° semaine)
I17					Activité totale en début de croissance exponentielle (Nb total d'individus cumulés)
I18					Activité totale en fin de croissance exponentielle (Nb total d'individus cumulés)
I19					Activité totale (Nb total d'individus cumulés)
I20					Activité moyenne sur le blé au pic d'activité (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)
I21					Activité moyenne sur l'asclépias au pic d'activité (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)
I22					Activité moyenne sur l'ortie au pic d'activité (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)
I23					Activité moyenne sur la tanaïsie au pic d'activité (Nb moyen d'individus/unité d'échantillonnage)
I24					Succession communautaire pendant la période d'infestation primaire des aubergines
I25					Succession communautaire pendant la période d'infestation secondaire des aubergines

**PB : plantes-banques**

plantes-banques des tunnels aménagés d'une part, ainsi que sur le feuillage des aubergines des tunnels aménagés et témoins d'autre part. Pour cela, la taille des populations de pucerons a été estimée tous les 15 jours à l'aide d'une échelle de classe (échelle de classe « CTIFL REGULEG – Aubergine ») tandis que dans le même temps, les prédateurs de pucerons étaient dénombrés de visu. La température des tunnels a été suivie à un pas de temps journalier. En 2018 et 2019, le statut azoté des aubergines a été caractérisé en mesu-

rant la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes tous les 15 jours, de la plantation à la dernière récolte de fruits, via une analyse des jus pétiolaires effectuée selon le protocole de la méthode PILazo® développée par le CTIFL. Toujours en 2018 et 2019, la production de fruits a été estimée dans chaque tunnel en mesurant le nombre total de caisses d'aubergines à chaque date de récolte et la dynamique de floraison des plantes-ressources a été caractérisée dans les tunnels aménagés A1 et A2.

#### CONFRONTATION DES PROCESSUS RÉALISÉS AUX HYPOTHÈSES THÉORIQUES

À partir des données collectées et pour chaque année d'étude, (i) la cinétique d'infestation des plantes-banques et/ou des aubergines par les pucerons, (ii) la cinétique d'activité des populations de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques et/ou les aubergines, (iii) la structure des communautés de pucerons et de prédateurs de pucerons sur les plantes-banques et/ou les aubergines, et (iv) la

**TABLEAU 1 (2/3) : INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES PROCESSUS DE RÉGULATION NATURELLE DANS LES TUNNELS AMÉNAGÉS ET TÉMOINS ÉTUDIÉS. AU TOTAL, 70 INDICATEURS ONT ÉTÉ CALCULÉS DANS LE PROJET REGULEG**

Indicateur	Milieu	Objet	Période	Libellé
I26	Aubergine	Pucerons	Infestation primaire	Début de la période d'infestation primaire « A » (N° semaine)
I27				Croissance exponentielle primaire « A » (N° semaine)
I28				Pic d'infestation primaire « A » (N° Semaine)
I29				Durée de la période d'infestation primaire « A » (Nb semaines)
I30 (IP1)				Début de la période d'infestation primaire « A » - Début de la période d'infestation « PB » (Nb semaines)
I31				Croissance exponentielle primaire « A » - Croissance exponentielle « PB » (Nb semaines)
I32				Croissance exponentielle primaire « A » - Début de la période d'infestation primaire « A » (Nb semaines)
I33				Pic d'infestation primaire « A » - Pic d'infestation « PB » (Nb semaines)
I34				Fréquence de plantes fortement infestées (classe DE) au pic d'infestation primaire (%)
I35 (INF1)				Indice d'infestation primaire
I36				Espèce majoritaire pendant la période d'infestation primaire
I37 (IN1)				IN moyen pendant la période d'infestation primaire (mg/l)
I38				Début de la période d'infestation secondaire « A » (N° semaine)
I39				Croissance exponentielle secondaire « A » (N° semaine)
I40				Durée de la période d'infestation secondaire « A » (Nb semaines)
I41 (IP2)			Début d'infestation secondaire « A » - Début d'infestation « PB » (Nb semaines)	
I42			Début d'infestation secondaire « A » - Début d'infestation primaire « A » (Nb semaines)	
I43			Croissance exponentielle secondaire « A » - Croissance exponentielle « PB » (Nb semaines)	
I44			Croissance exponentielle secondaire « A » - Croissance exponentielle primaire « A » (NB semaines)	
I45			Pic d'infestation secondaire « A » - Pic d'infestation « PB » (Nb semaines)	
I46			Pic d'infestation secondaire « A » - Pic d'infestation primaire « A » (Nb semaines)	
I47			Fréquence de plantes fortement infestées (classe DE) au pic d'infestation secondaire (%)	
I48 (INF2)			Indice d'infestation secondaire	
I49			Espèce majoritaire pendant la période d'infestation secondaire	
I50 (IN2)			IN moyen pendant la période d'infestation secondaire (mg/l)	

PB : plantes-banques ; A : aubergine

cinétique de la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes pendant les périodes d'infestation primaire et secondaire ont été déterminées dans les tunnels aménagés et témoins (Figure 3). En 2018 et 2019, le régime de températures (somme de températures) ainsi que la production de fruits (poids cumulé) ont été caractérisées dans tunnels aménagés et témoins, et la dynamique de floraison des patches de plantes-ressources dans les tunnels aménagés a été décrite sous forme d'un diagramme de floraison.

Dans un second temps, les principaux paramètres des courbes et des figures qui ont été tracées ont été extraits (déconstruction d'une réalité complexe) et regroupés dans un tableau de synthèse (60 paramètres extraits au total). Certains de ces paramètres ont été considérés comme des indicateurs simples à part entière, tandis que d'autres ont servi à calculer des indicateurs plus complexes. Tous ces indicateurs (70 au total ; Tableau 1) ont ensuite été utilisés pour caractériser (i) la réussite de la

stratégie de lutte biologique par conservation étudiée (succès ou échec) et (ii) le contexte de production (climat des abris froids, statut azoté des plantes etc.). Ils ont également été utilisés pour décrire, sous la forme d'un diagramme séquentiel (reconstruction d'une réalité simplifiée), la dynamique du système biologique en jeu dans les tunnels aménagés A1 & A2 ainsi que dans les tunnels témoins T1 & T2 pendant chaque période d'infestation. Une analyse de ces diagrammes séquentiels a ensuite

**TABLEAU 1 (3/3) : INDICATEURS UTILISÉS POUR ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES PROCESSUS DE RÉGULATION NATURELLE DANS LES TUNNELS AMÉNAGÉS ET TÉMOINS ÉTUDIÉS. AU TOTAL, 70 INDICATEURS ONT ÉTÉ CALCULÉS DANS LE PROJET REGULEG**

Indicateur	Milieu	Objet	Période	Libellé
I51	Aubergine	Prédateurs		Début d'activité prédateurs « A » - Début de la période d'infestation primaire « A » (Nb semaines)
I52				Début d'activité prédateurs « A » - Début d'activité prédateurs « PB » (Nb semaines)
I53				Croissance exponentielle prédateurs « A » - Croissance exponentielle prédateurs « PB » (Nb semaines)
I54				Croissance exponentielle prédateurs « A » - Croissance exponentielle infestation primaire « A » (Nb semaines)
I55				Croissance exponentielle prédateurs « A » - Pic d'infestation primaire « PB » (Nb semaines)
I56				Croissance exponentielle prédateurs « A » - Pic d'infestation primaire « A » (Nb semaines)
I57				Pic d'activité prédateurs « A » - Croissance exponentielle prédateurs « A » (Nb semaines)
I58				Pic d'activité prédateurs « A » - Pic d'infestation « A » (Nb semaines)
I59				Pic d'activité prédateurs « A » - Pic d'infestation « PB » (Nb semaines)
I60				Pic d'activité prédateurs « A » - Pic d'activité prédateurs « PB » (Nb semaines)
I61				Vitesse d'accroissement des populations (Nb individus/semaine)
I62				Point d'inflexion (N° semaine)
I63				Activité en début de croissance exponentielle (Nb total d'individus cumulés)
I64				Activité en fin de croissance exponentielle (Nb total d'individus cumulés)
I65				Activité totale (Nb total d'individus cumulés)
I66				Activité moyenne au pic d'activité (Nb moyen d'individus / unité d'échantillonnage)
I67				Succession communautaire pendant la période d'infestation primaire
I68				Succession communautaire pendant la période d'infestation secondaire
I69	Tunnel			Production cumulée (kg)
I70				Somme de températures (°C)

PB : plantes-banques ; A : aubergine

été effectuée : lorsque le diagramme séquentiel obtenu correspondait à l'hypothèse de régulation pour un système de culture alternatif, les processus de régulation naturels initiés par la présence de plantes-banques dans les abris froids ont été considérés comme opérants ; a contrario, lorsque le diagramme séquentiel obtenu correspondait à 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 ont été considérés comme inopérants (Figure 4).

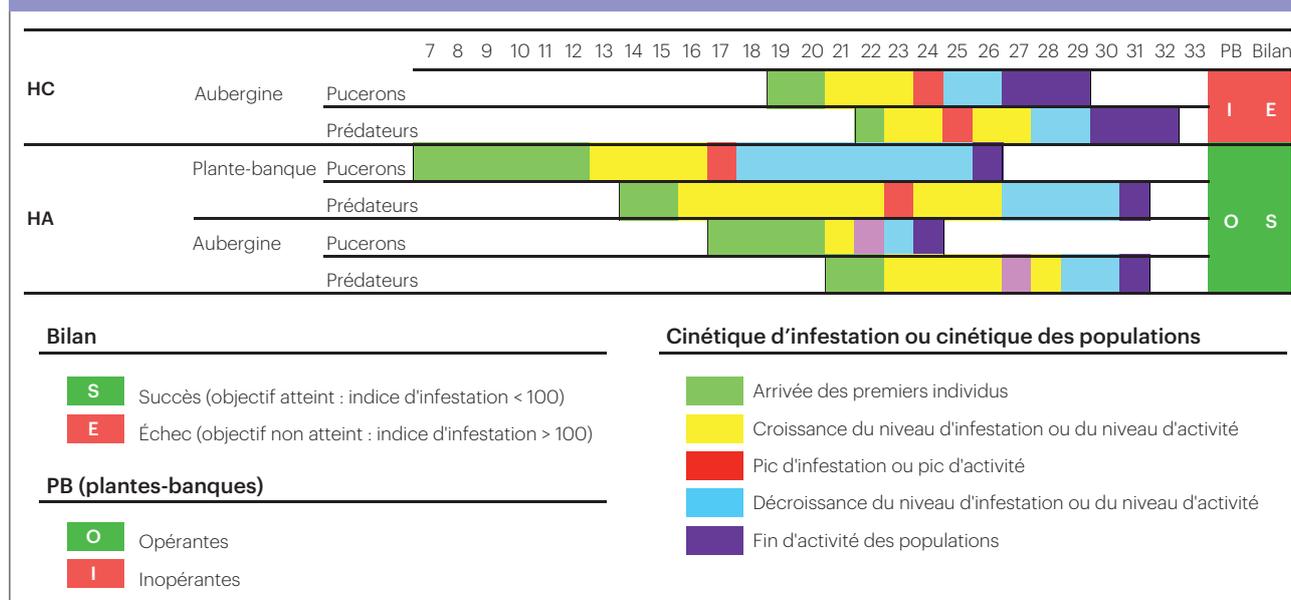
À partir de ce travail, les liens entre la réussite de la stratégie de lutte biologique mise en œuvre, le contexte de production, et la dynamique du système biologique ont été étudiés, et les hypo-

thèses de régulation posées en préalables ont été vérifiées ou infirmées. Les corrélations 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) ont également été étudiés. Les résultats des travaux menés en



> **APHIS URTICATA SUR ORTIE POUVANT JOUER UN RÔLE DE PROIE DE SUBSTITUTION**

FIGURE 4 : Exemple de diagramme séquentiel (simplifié) décrivant la dynamique de colonisation des plantes-banques et/ou des aubergines par les pucerons et leurs prédateurs attendue dans un tunnel aménagé (HA : hypothèse « alternative ») d'une part, et dans un tunnel témoin d'autre part (HC : hypothèse « conventionnelle »)



culture d'aubergine en adoptant l'approche mécaniste décrite dans cet article seront présentés dans un article de synthèse à paraître prochainement. À terme, l'approche « mécaniste » pourra être adoptée pour évaluer l'effet de stratégies de lutte biologique par conservation développées pour lutter contre d'autres ravageurs que le puceron (thrips, mouches ou noctuelles par exemple) et pour protéger d'autres cultures que l'aubergine (laitue, fraise, melon, poireau ou courgette par exemple). ■

## BIBLIOGRAPHIE

Picault S. (2021). *Protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques*. INFOS-CTIFL n° 374 (parution en septembre 2021).

Picault S. (2017). *Protection des cultures de poireau contre les thrips : des plantes de service pour attirer les ennemis naturels*. INFOS-CTIFL n° 334, p. 27-39.

Picault S., Cortesero A.M., Le Ralec A. (2013). *Caractérisation des prédateurs et/ou parasitoïdes de mouches du genre *Delia* en cultures de brassicacées et influence des abords de parcelle sur les processus de régulation naturelle*. Innovations Agronomiques n° 28, p. 169-185.

## CE QU'IL FAUT RETENIR

Évaluer l'efficacité de stratégies de lutte biologique par conservation pour protéger les cultures légumières contre les pucerons est un travail complexe. Pour cela, des méthodologies reposant sur des approches factorielles ont été développées. Celles-ci ont montré tout leur intérêt, mais elles présentent certaines limites. La première est liée au fait que l'aire de dispersion et/ou de prospection des ennemis naturels de pucerons est généralement peu ou mal connue, et qu'elle dépend sans doute davantage de la localisation des proies dans l'agroécosystème que d'une distance par rapport à des infrastructures agroécologiques particulières, même si cela reste à confirmer. Par conséquent, disposer de véritables parcelles témoins pour évaluer l'effet d'une stratégie de lutte par conservation par comparaison est difficile, et mettre en œuvre des démarches de travail basées sur la mise en évidence de gradients entre le bord et le centre des cultures n'est pas toujours pertinent. La seconde limite des méthodologies reposant sur des approches factorielles réside dans le fait que celles-ci cherchent souvent à évaluer l'efficacité des stratégies de lutte biologique uniquement à l'aune du niveau d'activité des ennemis naturels des pucerons (analyse quantitative des phénomènes écologiques). Or, ce niveau d'activité est davantage lié au niveau d'infestation des plantes par les pucerons qu'à la simple présence de plantes de service dans les cultures. Pour pallier ces limites, une approche mécaniste a été développée dans le cadre du projet REGULEG. Cette approche consiste à décrire les mécanismes biologiques et écologiques réellement en œuvre dans le système de culture, puis à les comparer aux mécanismes biologiques et écologiques attendus en théorie, afin de vérifier que les mécanismes écologiques clés ont bien été enclenchés et que certains synchronismes sont respectés (analyse qualitative des phénomènes écologiques). Les tenants et les aboutissants de cette approche sont détaillés dans le rapport « Mise au point et évaluation d'une stratégie de protection des cultures d'aubergines contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques » disponible sur demande (Picault, 2021).