



HAL
open science

Halyomorpha halys : cycle de vie, dégâts, moyens de lutte actuels et nouvelles pistes de régulation.

Andréa Martelli, Lisa Gelé, Y. Tricault, Azélie Lelong

► **To cite this version:**

Andréa Martelli, Lisa Gelé, Y. Tricault, Azélie Lelong. Halyomorpha halys : cycle de vie, dégâts, moyens de lutte actuels et nouvelles pistes de régulation.. Nantes university; Université d' Angers; Agrocampus Ouest - Centre d'Angers; Biobest, 10 rue des Savoir-Faire, 44450 Saint-Julien-de-Concelles. 2026. ⟨hal-05592732⟩

HAL Id: hal-05592732

<https://hal.science/hal-05592732v1>

Submitted on 15 Apr 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

2023-2024

Master 2 - Plant Health and Protection (PHP)

Halyomorpha halys :
**cycle de vie, dégâts, moyens de lutte
actuels et nouvelles pistes de régulation.**

GELÉ Lisa

MARTELLI Andréa

Sous la direction de Mme. Lelong Azélie

Commanditaire | Azélie Lelong (Biobest®)

Tuteur universitaire | Yann Tricault (Agrocampus-Ouest)

Soutenu le 22/02/2024



LEXIQUE

Anses : agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Biopesticides (ou pesticides biologiques) : comprennent plusieurs types de méthodes de lutte contre les ravageurs et maladies. Ils caractérisent des substances chimiques ou des agents de prédation/de parasitisme issus de sources naturelles (bactéries, champignons, virus, plantes, animaux, minéraux). L'Union européenne les définit comme « une forme de pesticides basée sur des micro-organismes ou des produits naturels ».

Diapause : période d'arrêt temporaire de l'activité de l'insecte en raison de conditions défavorables comme l'hiver ou la sécheresse.

H. halys : *Haliomorpha halys*.

Epizootie : maladie frappant, dans une région plus ou moins vaste, une espèce animale ou un groupe d'espèces dans son ensemble.

Impact parasitoïde : nombre d'œufs parasités par rapport au nombre total d'œufs collectés sur le terrain.

Lutte biologique par augmentation : consiste à lutter contre les ravageurs et les maladies des cultures en augmentant par lâchers le nombre d'ennemis naturels ou d'agents pathogènes. Ici, libération du parasitoïde pour augmenter sa population et le répandre dans de nouvelles zones envahies par *H. halys*.

Mésocosme : dispositif expérimental est destiné à l'étude des réponses d'espèces dans leur milieu reconstitué ou à l'étude d'organismes soumis à des variations de l'environnement (sol, hygrométrie, température, teneur de l'air en CO₂) ou à des substances potentiellement toxiques.

Molécule Sémiochimique : molécule signal produite par un individu pour communiquer avec sa propre espèce (on parle de molécules intraspécifiques comme les phéromones) ou avec différentes espèces (molécules interspécifiques comme les allomones ou les kairomones). Une même substance sémiochimique peut jouer un rôle à la fois de molécule intraspécifique et interspécifique.

Multivoltine : se dit d'une espèce avec trois générations ou plus par an.

Oviposition : acte pour une femelle insecte de pondre et de placer ses œufs dans un endroit particulier pour favoriser l'éclosion.

Univoltine : se dit d'une espèce avec une seule génération par an.

UV-A : rayonnement ultraviolet correspondant à une longueur d'ondes de 320 à 400 nm.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES	-----	
TABLE DES TABLEAUX	-----	
I CONTEXTE DU PROJET ET PROBLEMATIQUE	-----	1
I-1 Biologie d' <i>Halyomorpha Halys</i>	-----	1
I-2 Présentation de l'entreprise	-----	2
I-3 Objectifs du projet	-----	2
II DÉMARCHE	-----	3
III RÉSULTATS ET ANALYSE	-----	4
III-1 Cycle de vie d' <i>Halyomorpha Halys</i>	-----	5
III-2 Méthodes de lutte actuelles contre <i>Halyomorpha Halys</i>	-----	7
III-2-a Méthodes de piégeage	-----	7
III-2-b Méthodes de lutte chimiques	-----	9
III-3 Nouvelles pistes de régulation pour <i>Halyomorpha Halys</i>	-----	10
III-3-a Autres méthodes de lutte	-----	10
III-3-b Lutte biologique	-----	11
III-3-c Suivi des Parasitoïdes	-----	17
IV CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	-----	18
V BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE	-----	20
V-a Bibliographie	-----	20
V-b Sitographie	-----	23

TABLE DES FIGURES

- Figure 1.** Carte du risque (basée sur la fréquence de simulations indiquant qu'une localité est climatiquement favorable à l'espèce) et des occurrences avérées d'*Halyomorpha halys* [1].
- Figure 2.** Évolution chronologique des signalements d'*Halyomorpha halys* sur le territoire français de 2012 à 2021 [3].
- Figure 3.** Critères de reconnaissance morphologiques d'*Halyomorpha halys* [6].
- Figure 4.** Dommages aux cultures causés par *Halyomorpha halys* [1][6][7].
- Figure 5.** Cycle de vie d'*Halyomorpha Halys* (créé sur Caneva - Lisa Gelé - Andréa Martelli).
Photos : T. Haye [1], J-C Streito (INRAE), [7].
- Figure 6.** Piège électrique multimodal utilisé contre *Halyomorpha halys* (Rodoni et al., 2022).
- Figure 7.** Pièges pyramidaux noirs pour *Halyomorpha halys* (Morrison et al., 2015).
- Figure 8.** Prototype de piège rotatif non létal pour la capture d'*Halyomorpha halys* (Suckling et al., 2019b)
- Figure 9.** Prototype de piège Nazgul pour la capture d'*Halyomorpha halys* (Suckling et al., 2019c).
- Figure 10.** Parasitoïdes sur œufs d'*Halyomorpha halys* [6].
- Figure 11.** Réponse proportionnelle des femelles adultes de *Trissolcus japonicus* ayant choisi un leurre à la kairomone ou le contrôle (n = 32-105) au cours de la période expérimentale de 30 minutes (Richardson et al., 2023).
- Figure 12.** Concept de la SIT inspiré de Welsh et al. (2017).

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des pesticides interdits et autorisés en France dans le cadre de la lutte contre *Halyomorpha halys*.

Tableau 2. Comparaison des avantages et inconvénients propres aux différentes méthodes de lutttes actuelles et en développement contre *Halyomorpha halys* [9].....

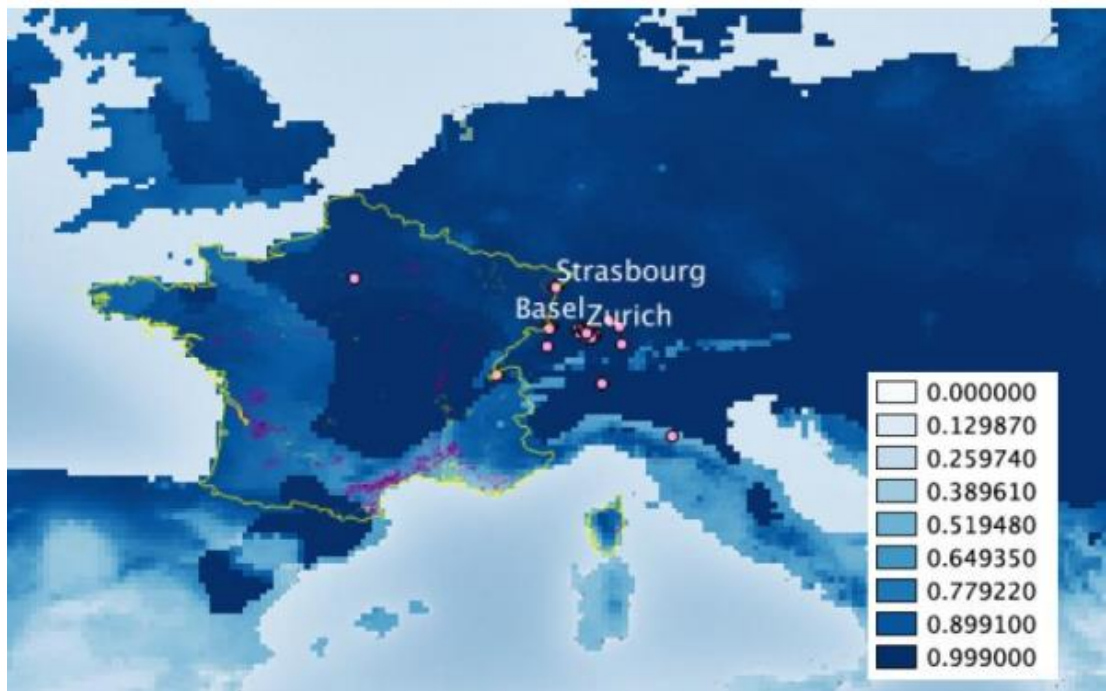


Figure 1. Carte du risque (basée sur la fréquence de simulations indiquant qu'une localité est climatiquement favorable à l'espèce) et des occurrences avérées d'*Halyomorpha halys* [1].

En violet et jaune sont représentées les zones viticoles et les zones de plantation d'arbres fruitiers

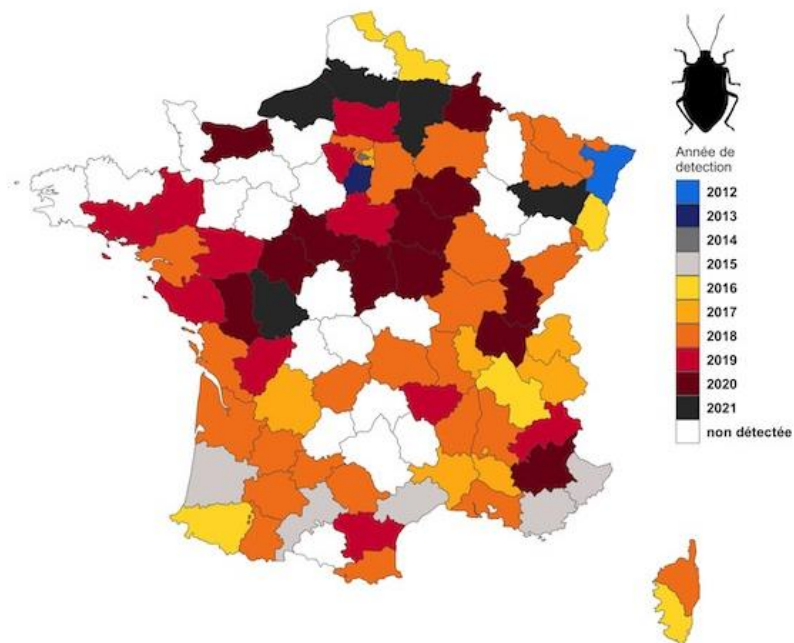


Figure 2. Évolution chronologique des signalements d'*Halyomorpha halys* sur le territoire français de 2012 à 2021 [3].

I CONTEXTE DU PROJET ET PROBLEMATIQUE

I-1 Biologie d'*Halyomorpha Halys*

Halyomorpha halys, aussi retrouvée sous la dénomination vernaculaire de “punaise diabolique” ou “punaise marbrée”, est un insecte phytophage piqueur-suceur très polyphage (plus de 120 plantes hôtes [1], voire jusqu’à 275 d’après Rodoni *et al.* (2022)) appartenant à la famille des Pentatomidae (hémiptères, hétéroptères) [4]. Originaire d’Asie de l’Est (Chine, Japon, Corée), elle a été introduite (via transport passif comme « autostoppeur » non lié à une filière végétale et via transport lié à une plante hôte) en Amérique et en Europe, où elle est désormais un ravageur de plus en plus problématique (figure 1). Elle impacte les cultures d’arbres et arbustes fruitiers (pommiers, poiriers, myrtilier, ...), de légumes (tomates, poivrons, ...), de plantes ornementales (les genres les plus touchés étant : Acer, Ailanthus, Catalpa, Cercis, Ilex, Magnolia, Malus, Mimosa, Morus, Paulownia, Platanus, Prunus, et Syringa [1]), et les grandes cultures (maïs, soja, coton, ...). On la retrouve aujourd’hui dans tout l’hémisphère nord. Signalée initialement en 2000 aux USA (Hoebeker et Carter, 2003), elle est ensuite signalée en Europe en 2004 après plusieurs vagues d’introduction en provenance des USA et de l’Asie (Morisson *et al.*, 2017). En France, *H. halys* est repérée initialement en 2012 dans le Bas-Rhin, puis à Paris en 2013. En 2014, elle est déclarée comme “danger pour les cultures” par l’Anses*. Elle sera par la suite signalée dans le Var et les Alpes-Maritimes en 2015 avant de finir de s’étendre sur la quasi-totalité du territoire français (figure 2). Les premiers dégâts liés à *H. halys* ont été constatés dans les cultures arboricoles, cependant plus récemment, ces dégâts se sont étendus au domaine du maraîchage.

H. halys inflige des dégâts aux plantes par insertion de ses stylets (protégés par une gaine, l’ensemble formant le rostre, voir figure 3) le plus souvent dans les fruits, partie de la plante présentant le plus important intérêt économique (figure 4). Les larves et adultes peuvent également se nourrir sur les tiges, feuilles et fleurs. L’insecte en se nourrissant peut causer des marques et des déformations (figure 4) sur les semences et les fruits (notamment de type gousse), avec des zones spongieuses blanchâtres à la surface des fruits, ou des dommages des tissus (décolorations, tâches de la chair). En plus des pertes de qualité des fruits, les piqûres peuvent entraîner des baisses de rendement suite à l’avortement des bourgeons floraux ou à la chute des jeunes fruits. Chez les fruits à coque, les piqûres accroissent le nombre de fruits vides. Comme c’est le cas pour beaucoup de Pentatomidae, des populations assez faibles pour ne pas être remarquées sont suffisantes pour causer des pertes de 25% sur les récoltes. Sur vigne, il a été montré qu’*H. halys* pouvait affecter la qualité du vin lorsqu’elle se nourrit sur les grappes de raisins au moment de la récolte. *H. halys*

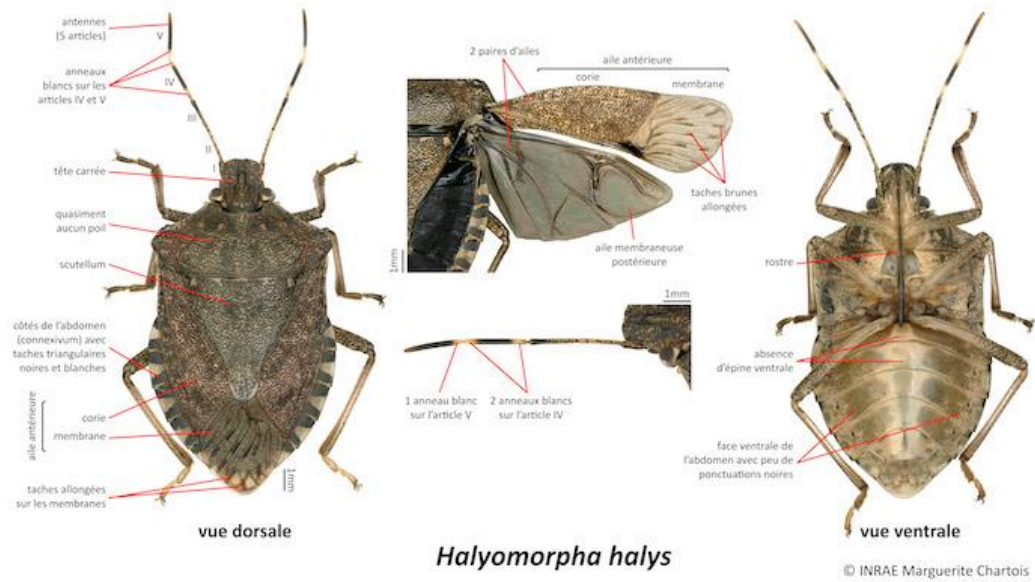


Figure 3. Critères de reconnaissance morphologiques d'*Halyomorpha halys* [6].

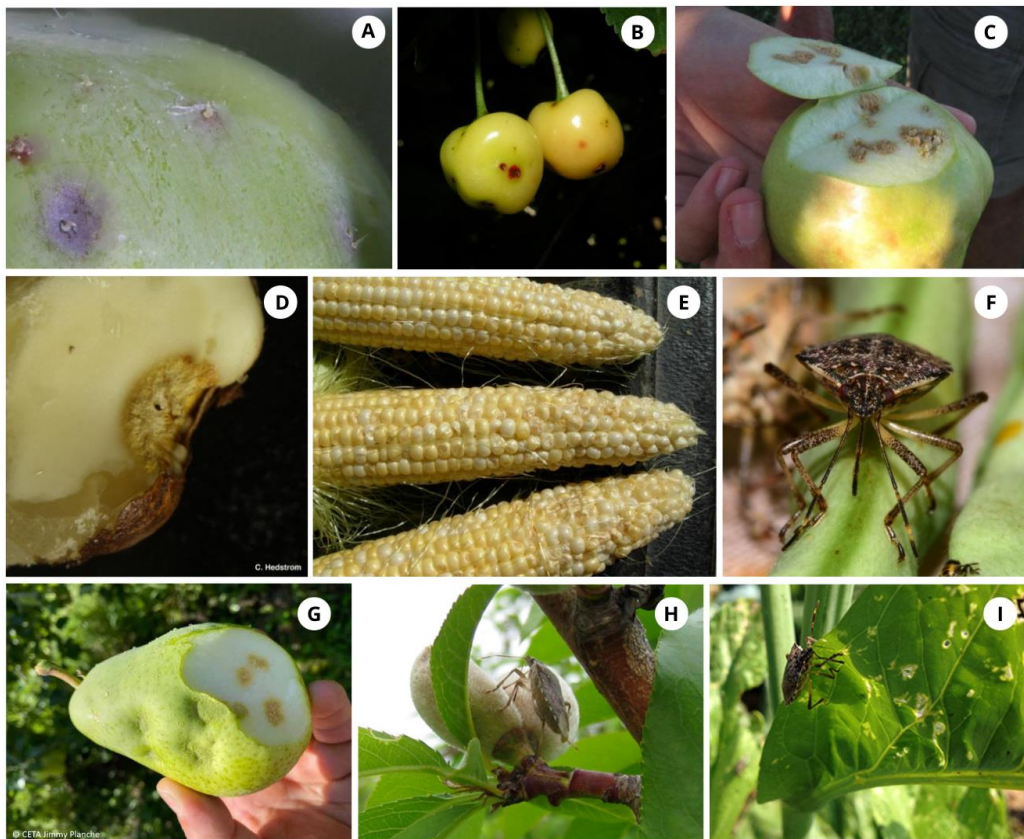


Figure 4. Dommages aux cultures causés par *Halyomorpha halys* [1][6][7].

Dégâts sur myrtille (A), sur cerise (B), pomme (C), noisette (D), maïs doux (E), poire (G).

Adulte se nourrissant sur haricot (F), abricotier (H), sur moutarde (I).

peut également causer des dégâts sur une large gamme de légumes (majoritairement de fin juillet à septembre) avec des pertes pouvant excéder 50% de rendement [1]. En plus des dégâts directs, *H. halys* peut transmettre mécaniquement des bactéries et des levures phytopathogènes comme *Eremothecium coryli*. Elle peut également être vectrice de maladies cryptogamiques comme l'anthracnose pouvant causer la pourriture des fruits. En Asie, *H. halys* est également vecteur du phytoplasme responsable de la maladie des balais de sorcière du Paulownia (witches-broom, PaWB). Les arbres infectés ont une croissance et une vigueur réduite ce qui entraîne leur mort prématurée (le bois issu des arbres infectés n'est pas commercialisable) [1].

I-2 Présentation de l'entreprise

Fondée en 1987 par Rolland de Jonghe, Biobest® est une entreprise pionnière dans la production de bourdons. Elle est devenue l'un des leaders mondiaux de la pollinisation naturelle et de la lutte biologique contre les ravageurs et les maladies et regroupe aujourd'hui 22 sociétés sur les 5 continents, avec des distributeurs dans plus de 65 pays et plus de 1 300 employés au niveau mondial. Les produits proposés par l'entreprise sont essentiellement destinés aux cultures de légumes, de plantes ornementales, de fruits à baies et d'arbres fruitiers. Connue depuis de nombreuses années pour ses bourdons et sa large gamme d'insectes bénéfiques, d'acariens et de nématodes, l'entreprise propose aujourd'hui une gamme complète de solutions naturelles comprenant des biopesticides, des outils de surveillance et de dépistage, des phéromones..., afin de garantir des produits sains et un environnement de culture propre. La mission de Biobest® est de contribuer à une production mondiale durable de cultures à forte valeur en proposant des produits de protection biologique des cultures et favorisant la pollinisation [2],[5].

I-3 Objectifs du projet

Ce projet a pour objectif de synthétiser les connaissances contemporaines sur le cycle de vie d'*H. halys*, sur les méthodes de luttés actuelles et sur les nouvelles pistes de régulation de ce ravageur. L'étude sur le cycle de développement intègre la mise en évidence des moments les plus opportuns à l'implémentation de diverses méthodes de lutte. Ce travail de synthèse bibliographique permettra d'une part au commanditaire de gagner du temps sur la recherche d'informations concernant *H. halys*, et sera d'autre part un support éventuel pour l'élaboration d'une gamme de produits biologiques de contrôle de ce ravageur par Biobest®. Il n'existe actuellement aucune méthode de lutte efficace commercialisée contre *H. halys*, ce qui augmente l'enjeu de la mise au point de nouvelles méthodes efficaces, ciblées et durables.

II DÉMARCHE

Le travail sur ce projet a très majoritairement été réalisé à distance. Les échanges ont eu lieu par messages la plupart du temps, afin de laisser une trace écrite consultable ultérieurement et permettant un travail asynchrone. Quelques visioconférences ont été nécessaires ponctuellement lorsque la suite du travail nécessitait un échange plus vaste et une confrontation d'idées. Les créneaux du jeudi après-midi, initialement dédiés au projet, n'ont que peu été utilisés à cette fin durant le premier semestre en raison de la date tardive de démarrage du projet, de modifications de dernière minute de l'emploi du temps et de la charge de travail liée aux autres matières. La totalité du projet, hormis la lettre de mission et le diagramme de Gantt, a été réalisée pendant les vacances de Noël et le début du deuxième semestre.

Des documents partagés en ligne ont été créés afin que chacun puisse contribuer au projet à distance et selon ses disponibilités. En tout, 8 documents partagés ont été nécessaires à la réalisation du projet : lettre de mission (Google drive), diagramme de Gantt (Google drive), document brouillon pour la recherche d'informations en vue de la rédaction de la synthèse bibliographique (Google drive), synthèse bibliographique (Google drive), analyse critique (Google drive), document de création des figures pour illustrer la synthèse bibliographique (Canva), poster récapitulatif (Canva, document commun avec l'autre groupe travaillant sur un projet Biobest®), diaporama support visuel pour l'oral (Canva). La mise en page finale a été effectuée sur Word (renvoi à la page, numérotation, etc...). Deux groupes de discussion en ligne (Messenger) ont également été mis en place pour faciliter les échanges entre étudiants d'un même projet et entre étudiants partageant le même commanditaire et travaillant sur des projets différents. La recherche d'articles a été effectuée majoritairement sur PubMed®. La bibliographie a été mise en forme avec zoterobib, en utilisant le format "The Journal of Experimental Biology". La sélection d'articles a, au départ, été effectuée par un membre désigné du groupe. Cette recherche d'abord générale a permis d'obtenir un panorama de l'état actuel des connaissances et de faire ressortir les axes de recherches dominants sur le ravageur, ainsi que ceux jugés les plus pertinents au vu de notre problématique. Par la suite, chaque membre était chargé de la recherche de nouveaux articles en lien avec sa partie dédiée, en privilégiant des articles récents.

Une personne désignée au sein du groupe a pris en charge les échanges avec la commanditaire, le tuteur universitaire et la responsable de module, afin de faciliter la communication. Deux personnes désignées ont pris en charge respectivement la rédaction de la lettre de mission et la création du diagramme de Gantt.

Chaque document remis a d'abord été relu par les deux membres du groupe avant envoi. Chaque membre du groupe était responsable des recherches bibliographiques concernant une ou

plusieurs parties ou sous-parties de la synthèse bibliographique. Un des membres du groupe était responsable, en plus des recherches lui étant attribuées, de la rédaction des paragraphes à partir de ses recherches et de celles de l'autre membre afin d'obtenir un ensemble cohérent, facilitant la compréhension du lecteur. Le document final a ensuite été relu plusieurs fois par les deux membres du groupe et ajusté d'accord commun. Les figures créées aux fins de la synthèse et les modifications et corrections apportées par le tuteur universitaire ont aussi été effectuées en binôme. Une méthodologie similaire a été suivie pour la réalisation du poster : le travail a été très largement réalisé à distance avec concertation entre les parties pour les corrections et modifications. Le rythme de travail (moments et durée) était propre à chacun. L'esthétique du poster récapitulatif a été choisie en accord avec l'autre groupe travaillant sur un projet Biobest® nécessitant également la réalisation de flash cards. L'objectif était de fournir à la commanditaire des documents homogènes en termes de couleurs et de format en vue de l'affichage.

Les deux rencontres obligatoires avec la commanditaire ont eu lieu comme indiqué sur le diagramme de Gantt, à savoir le jeudi 09/11/2023 et le jeudi 18/01/2024. La seconde rencontre a réuni la commanditaire ainsi que le tuteur universitaire, afin de faire un point sur l'avancement du projet et d'apporter des réponses à certaines interrogations sur les méthodes de luttres à couvrir. Nous n'avons pas été en mesure d'assister au SIVAL comme prévu le 17/01/24 en raison d'une alerte à la bombe dans la matinée qui a eu pour conséquence le renvoi à domicile des élèves. Nos emplois du temps respectifs ne nous ont pas permis de nous y rendre le lendemain. Ceci n'a pas eu un grand impact sur notre travail car aucune conférence ciblée sur *H. halys* n'y était prévue.

Durant ce projet, nous avons rencontré des difficultés avec l'un des membres du groupe qui n'a produit aucun travail et a posé des problèmes de comportement. Cet incident a entraîné des pertes de temps conséquentes ainsi qu'une augmentation de la charge de travail pour les deux membres restants du groupe. Deux réunions ont été organisées pour résoudre ce problème. La première s'est tenue en distanciel (via Microsoft Teams) et a réuni Mme. C. Champion (responsable du module projets commandités, responsable de la spécialisation PHP) et les deux membres restants du groupe (L. Gelé, A. Martelli) le mardi 16/01/2024. La seconde réunion a eu lieu en présentiel le mardi 23/01/2024 et a réuni les trois membres initiaux du projet ainsi que Mme. C. Champion et M. T. Guillemette (responsable de parcours M2). A l'issue de cette réunion, nous avons obtenu l'autorisation par M. T. Guillemette de finir le projet à deux.

III RÉSULTATS ET ANALYSE

III-1 Cycle de vie d'*Halyomorpha Halys*

H. halys est une espèce multivoltine* avec une seule génération par an dans des climats tempérés, et jusqu'à quatre générations ou plus dans le sud de sa zone d'origine (Chine). La reproduction des adultes a lieu durant l'été. Chez les populations univoltines*, les nouveaux adultes ne sont pas immédiatement matures sexuellement et doivent passer l'hiver dans des zones protégées avant de pouvoir se reproduire l'été suivant. L'hivernation est induite par la diminution de la longueur des jours à la fin de l'été (photopériode minimum de 13,5 h selon Morrison et al. (2017a)) et se termine le printemps suivant avec l'augmentation de la température et de la durée d'ensoleillement. Dans des conditions naturelles, les punaises passent l'hiver dans des crevasses sèches, sous les écorces épaisses d'arbres morts encore sur pied (particulièrement *Quercus spp.* et *Robinia spp.*). *H. halys* est également attirée par les fissures et les crevasses des infrastructures créées par l'homme incluant les véhicules, les bâtiments, les maisons et d'autres constructions où elles sont sources de nuisances (peur, allergies). Ce sont les adultes sexuellement immatures qui hivernent. Ils quittent leur site d'hivernation et commencent à se nourrir au printemps, mais l'oviposition* ne commence que six à huit semaines plus tard et se poursuit pendant l'été.

Chez *H. halys*, les deux sexes sont séparés (morphotypes sexuels mâle et femelle). Les individus mâles émettent des phéromones (notamment une phéromone d'agrégation attractive pour les larves et les adultes, constituée de (3S, 6S, 7R, 10S) -10, 11-epoxy-1-bisabolen-3-ol et de (3S, 6S, 7R, 10R) -10, 11-epoxy-1-bisabolen-3-ol [1]) et des vibrations spontanées spécifiques, captées par les femelles qui émettent en réponse des vibrations à basse fréquence. Ceci stimule les mâles qui se mettent à produire plus de phéromones et de signaux vibratoires et se déplacent vers la femelle en s'orientant grâce aux vibrations. A ceci s'ajoute l'émission de chants, favorisant la mise en contact des individus (Polajnar and al., 2016). Une fois les partenaires à proximité, une parade nuptiale commence. Elle se compose de signaux tactiles, chimiques et de comportement de stimulation de la vision. Si cette parade est fructueuse, l'accouplement a lieu (Polajnar et al., 2016). Comme beaucoup de Pentatomoidea, les femelles d'*H. halys* pondent leurs œufs groupés. Chaque plaque comprend environ 28 œufs, lisses et de couleur pâle. Les femelles pondent durant toute leur vie soit environ un total d'environ 240 œufs. Les pontes sont généralement déposées sur la face inférieure des feuilles ou sur des tiges des plantes hôtes. Toutefois des pontes sur d'autres supports sont possibles et des œufs observés ont été observés sur des supports fabriqués par l'homme et sur des plantes non-hôtes. Aux USA l'activité de ponte a été observée de mai à fin août. L'éclosion a lieu trois à six jours après l'oviposition, le développement de l'œuf à l'adulte requiert de 32 à 35 jours à 30°C [1].

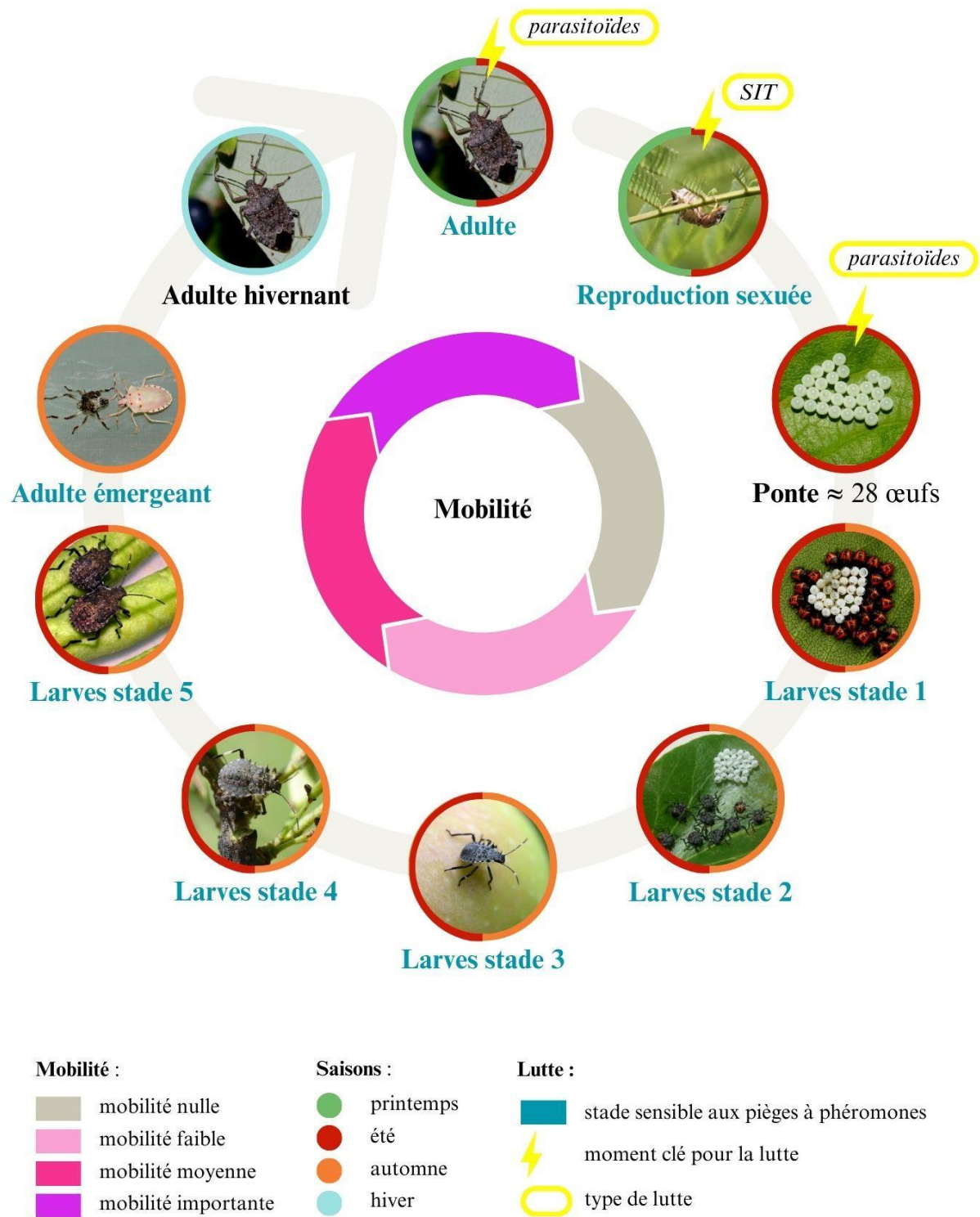


Figure 5. Cycle de vie d'*Halyomorpha Halys* (créé sur Canva - Lisa Gelé - Andréa Martelli).

Photos : T. Hays [1], J-C Streito (INRAE), [7].

SIT : Sterile Insect Technique (ou technique de l'insecte stérile).

En conditions naturelles avec des températures fluctuantes (en moyenne entre 15,9 à 19,9°C, climat tempéré), le développement de l'œuf à l'adulte demande de 60 à 107 jours. Les femelles ont une capacité de ponte moyenne de 79 œufs par saison de ponte en conditions naturelles. Le taux maximum de fécondité observé en laboratoire est de 200 à 480. A des températures moyennes inférieures à 15°C, aucune oviposition n'a été observée au champ et les œufs ne se développent pas. A 15°C, les œufs se développent jusqu'au premier stade larvaire, cependant, aucun développement ultérieur n'est possible. La température optimale de développement est de 30°C. Les températures critiques pour le développement de *H. halys* sont 15°C en limite basse, et 31 à 34°C en limite haute, à 35°C, les œufs ne se développent plus [1]. Il y a cinq stades larvaires. Le premier stade ne se nourrit pas, les larves restent groupées autour de la ponte et se déplacent peu. Le second stade se disperse activement, à la recherche de nouvelles plantes hôtes et commence à se nourrir en piquant les feuilles, tiges, fruits et semences. Les larves se dispersent activement en marchant et montrent une forte tendance à la fois au laboratoire et au champ à se déplacer. Dans les régions tempérées, les adultes commencent à se nourrir en avril et l'oviposition débute au début du mois de juin et continue jusqu'en septembre. Les nouvelles générations d'adultes apparaissent de la mi-juin jusqu'au début du mois de septembre. En Suisse *H. halys* est strictement univoltine, les adultes ayant hiverné apparaissent dès le mois d'avril mais l'oviposition ne débute pas avant la mi-juin. Le pic d'oviposition a lieu début juillet mais on peut trouver des œufs jusqu'en septembre. Les premiers adultes de la nouvelle génération émergent dès la dernière semaine d'août mais la majorité émerge en septembre (figure 5) [1]. Les adultes ont une espérance de vie allant de quelques mois à un an [4].

H. halys se nourrit surtout sur les organes reproducteurs et ne reste donc qu'un temps limité sur chaque plante. Elle a de bonnes capacités de dispersion naturelle et ce à tous les stades de développement (œuf exclu), surtout au stade adulte. Elle est considérée comme un ravageur très mobile, capable de migrations à la recherche d'hôtes favorables, se déplaçant notamment de plantes fructifiant précocement vers des plantes à fructification plus tardive. Peu de plantes hôtes telles que *Paulownia tomentosa*, *Ailanthus altissima*, *Ilex aquifolium* et *Prunus persica* sont attractives durant toute leur saison de végétation. Elles permettent à *H. halys* d'y accomplir son cycle complet de développement. Les adultes sont capables de vols sur de longues distances. *H. halys* est par ailleurs aidée dans sa dispersion par les activités humaines, notamment via un transport passif dans des véhicules divers. Des études génétiques montrent qu'*H. halys* a pu établir des populations invasives à partir d'un nombre réduit de spécimens fondateurs [1]. Il est donc impératif de trouver des méthodes efficaces et sélectives de neutralisation de ce ravageur, capables de cibler le plus d'individus possibles afin d'éviter cet effet de dispersion et d'invasion.



Figure 6. Piège électrique multimodal utilisé contre *Halyomorpha halys* (Rodoni et al., 2022).



Figure 7. Pièges pyramidaux noirs pour *Halyomorpha halys* (Morrison et al., 2015).

III-2 Méthodes de lutte actuelles contre *Halyomorpha Halys*

III-2-a Méthodes de piégeage

L'utilisation de pièges physiques permet non seulement la capture des ravageurs mais est également utile au processus de surveillance sur le territoire. En effet, la détection précoce de l'arrivée de ce type de ravageur sur une culture est indispensable afin de mettre en place une lutte efficace et de limiter les pertes. Pour la mise en place et l'utilisation de ces pièges un point majeur est la vérification de leur spécificité, afin d'éviter la capture d'espèces non-cibles.

Pour attirer et piéger les individus *H. halys*, il est possible d'utiliser une combinaison de stimuli visuels et olfactifs. Les pièges visuels les plus utilisés et étudiés dans la littérature sont ceux utilisant la lumière UV-A* et la lumière visible bleu-verte comme (figure 6) (Rodoni *et al.* 2022).

Le couplage d'un attractant visuel avec un attractant olfactif, via l'utilisation de molécules sémiochimiques*, permet de créer un effet de synergie. On parle alors de pièges multimodaux (Morrison *et al.*, 2017b). Pour cela, des phéromones synthétiques ou l'odeur d'individus piégés sont utilisées pour attirer d'autres individus *H. halys*. Parmi les phéromones les plus utilisées, on retrouve les phéromones d'agrégations à deux composantes appelées PHER (pour (3S,6S,7R,10S)-10,11-epoxy-1-bisabolen-3-ol et (3R,6S,7R,10S)-10,11-epoxy-1-bisabolen-3-ol) (Leskey *et al.*, 2021). Ces phéromones d'agrégations sont naturellement produites par les insectes grégaires et leur permettent d'attirer des individus à des fins reproductives ou afin d'indiquer la présence d'une source de nourriture. Une PHER utilisée en synergie avec la MDT (methyl (2E,4E,6Z) - decatrienoate), une autre substance sémiochimique, peut permettre une capture des adultes et des larves d'*H. Halys* 2 à 8 fois plus efficace qu'avec la PHER seule (Europe) (Weber *et al.*, 2014). L'usage de ces molécules sémiochimiques en synergie, ainsi que des systèmes d'attraction visuelle précédemment cités, ne semble entraîner aucune différence d'attrait pour les deux morphotypes sexuels d'*H. halys*.

Ces techniques de piégeage multimodal peuvent se présenter sous différentes formes, les plus courantes étant les pièges pyramidaux noirs, au sol ou déployés dans les arbres (figure 7) (Morrison *et al.*, 2015). On retrouve aussi des méthodes de piégeage plus basiques et moins coûteuses, comme les pièges collants transparents, remplacés régulièrement. Seuls, ils ne sont pas sélectifs, cependant, leur sélectivité peut être améliorée par couplage à des dispositifs de stimulation visuelle et/ou olfactive. Il est également possible d'augmenter l'efficacité des pièges en les combinant à d'autres techniques. Par exemple, l'utilisation de vibrations peut avoir un impact sur le comportement reproductif de *H. Halys* et rendre les pièges jusqu'à 7 fois plus efficaces.



Figure 8. Prototype de piège rotatif non létal pour la capture d'*Halyomorpha halys* (Suckling et al., 2019b).



Figure 9. Prototype de piège Nazgul pour la capture d'*Halyomorpha halys* (Suckling et al., 2019c).

Comme expliqué en 3.1, l'usage des vibrations, en complément des phéromones relâchées, leur permet de localiser de potentiels partenaires sexuels. Ceci explique pourquoi certains individus d'*H. halys* peuvent avoir tendance à rester à proximité des pièges à phéromones sans pour autant y pénétrer (Polajnar et al., 2016). L'ajout d'un ventilateur couplé au piège peut aussi permettre d'aspirer les punaises à proximité et de faciliter la dispersion des phéromones. La mise en place d'une grille pour bloquer l'entrée d'oiseaux ou de petits mammifères dans le piège permet également de maximiser la sélectivité et l'efficacité du piège. Enfin, l'installation de filets "insect-proof" en vergers peut offrir une protection physique en empêchant l'arrivée des punaises (Rodoni et al. 2022). Cependant, le coût de telles installations est conséquent et nécessite un important travail de mise en place. De plus, ces structures pourraient piéger le ravageur s'il est déjà présent sur la culture ou empêcher une action efficace d'éventuels auxiliaires en empêchant leur arrivée sur la culture. Selon une étude menée par Morrison et al. (2017a), il est nécessaire de noter que les pièges précédemment cités, notamment ceux utilisant des stimuli olfactifs, ne permettent pas d'attirer *H. Halys* pendant sa période de diapause* hivernale. En effet, il a été observé qu'avant l'arrivée du printemps (lorsque la photopériode atteint 13,5 heures), seuls 8 à 20% des individus capturés l'étaient grâce aux pièges à phéromones, ce qui indique que ces derniers sont peu efficaces durant cette période. La détection de *H. halys* (Nouvelle-Zélande) à l'aide de pièges dépend de panneaux collants contenant une phéromone d'agrégation, peu coûteux mais inefficaces par rapport au battage du feuillage. Il est donc nécessaire d'améliorer les systèmes actuels de surveillance et de destruction de ce ravageur, afin d'accroître la sensibilité de la détection et de réduire l'utilisation des pesticides (Suckling et al., 2019c). De nouveaux pièges létaux ou non (figure 8) constitués de cylindres appâtés à la phéromone d'agrégation et munis d'une girouette, dont l'extrémité au vent est recouverte d'un filet et l'extrémité sous le vent est scellée par un cône amovible à filet n'autorisant que l'entrée, qui admet les insectes attirés ont été testés (Italie). Ils ont capturé jusqu'à 15 fois plus d'adultes *H. halys* que les panneaux collants appâtés de manière identique (prise maximale des nouveaux pièges : 96 adultes vivants en 24 heures ; amélioration moyenne ~7 fois par rapport aux panneaux collants). Ces pièges non létaux rotatifs, qui exploitent un entonnoir en maille orienté vers le panache sous le vent, se sont avérés utiles pour collecter les adultes ce qui pourrait être utile pour la technique de l'insecte stérile ou pour soutenir les colonies d'élevage ou encore pourraient également être utilisés pour tuer les insectes (Suckling et al., 2019b).

Suckling et al. ont également élaboré un système de piégeage alternatif des adultes et des larves de *H. halys* appelé "Nazgûl" (figure 9). C'est un piège basé sur le principe d'attract and kill constitué d'un cintre appâté à la phéromone d'agrégation et recouvert d'un treillis de couleur sombre traité à l'insecticide de longue durée. Ces pièges ont capturé et tué jusqu'à 3,5 fois plus de

Famille chimique	Pesticides autorisés en France	Pesticides interdits en France
Pyréthrinoïdes		<ul style="list-style-type: none"> ○ Bifenthrin ○ Beta-cyfluthrin ○ Fenpropathrin ○ Permethrin
Néonicotinoïdes	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Dérogations possibles.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Thiaméthoxam ○ Dinotéfurane ○ Clothianidin
Carbamates		<ul style="list-style-type: none"> ○ Méthomyl ○ Oxamyl
Organophosphorés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Malathion 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Acephate ○ Diméthoate ○ Méthidathion ○ Chlorpyrifos
Organochlorés		<ul style="list-style-type: none"> ○ Endosulfan
Inhibiteurs de biosynthèse de chitine		<ul style="list-style-type: none"> ○ Novaluron ○ Diflubenzuron
Autres	<ul style="list-style-type: none"> ○ Sulfoxaflor 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cyclanilprole

Tableau 1. Liste des pesticides interdits et autorisés en France dans le cadre de la lutte contre *Halyomorpha halys* [9].

larves et d'adultes que les panneaux collants appâtés de manière identique et ont fourni un instantané de la phénologie par stade. Ce dispositif pourrait contribuer à la suppression d'une population délimitée et pourrait être inclus dans un programme d'éradication basé sur la sémiochimie. L'attraction et la destruction des femelles et des larves, éliminant ainsi la future progéniture, pourrait contribuer à la suppression de la population au cours d'une éradication (Suckling et al., 2019c).

III-2-b Méthodes de lutte chimiques

L'usage des différentes techniques de piégeage précédemment évoquées permet une certaine neutralisation d'*H. halys* en vergers et dans les cultures, mais ne suffit pas à réduire suffisamment les populations et donc les dégâts engendrés. De ce fait, et pour limiter au maximum les pertes de rendement, l'usage de pesticides synthétiques est aujourd'hui la méthode la plus employée pour lutter contre ce ravageur (Leskey et al., 2012).

De nombreux insecticides sont utilisés au niveau mondial dans le cadre de la lutte contre *H. halys*. Des travaux de recherche sur leur efficacité ont montré que les substances dites à large spectre sont les plus efficaces (Kuhar et Kamminga, 2017). Parmi les insecticides testés en laboratoire (liste non exhaustive), ceux générant la plus forte mortalité chez *H. halys* ont été retenus. Ils se répartissent dans quatre grandes familles chimiques : les pyréthrinoïdes (bifenthrine, beta-cyfluthrine, fenpropathrine, perméthrine), les néonicotinoïdes (thiaméthoxame, dinotefuran, clothianidine), les carbamates (méthomyl, oxamyl), les organophosphorés (diméthoate, malathion, méthidathion, chlorpyrifos, acephate) (tableau 1). Un organochloré, l'endosulfan, s'est également révélé efficace (Leskey et al, 2012). Ces résultats proviennent de tests réalisés aux USA. Il est donc important de se fier aux tests effectués dans des États américains présentant un climat similaire à celui de la France lors du choix de la substance active ou du produit.

Pour certaines cultures légumières (poivron, tomate) des travaux de recherche non publiés suggèrent que le dinotéfurane et les néonicotinoïdes appliqués au sol ou par goutte à goutte permettrait de contrôler *H. halys* pendant plusieurs semaines et éviteraient ainsi une application foliaire ([1], Morrison et al. 2015).

Sparks et al., (2010) ont étudié les fondements putatifs de la polyphagie et le potentiel de résistance aux insecticides de *H. halys*. Ils ont identifié un grand nombre des gènes (régissant des caractéristiques biologiques diverses : fonctions sensorielles, digestion, immunité, détoxification, développement) qui pourraient être utilisés comme cibles de biopesticides* car soutenant probablement la capacité d'invasion de *H. halys*. A titre d'exemple, le génome de *H. halys* ne

présente que deux gènes Delta glutathion S-transférase, associés au développement de la résistance aux insecticides dans d'autres taxons. Cependant, il est possible qu'une régulation à la hausse de l'expression des gènes suffise, dans certaines circonstances, à conférer un phénotype de résistance. Cinquante-neuf gènes de β -estérase ont été identifiés ainsi que deux gènes d'acétylcholinestérase et diverses neurologines, indiquant une capacité innée à développer une résistance aux insecticides. Cent-quarante-et-un cytochromes P450 ont été observés, les membres de cette famille de gènes peuvent conférer une résistance aux insecticides et sont notamment impliqués dans le développement de l'insecte. La disponibilité de la séquence du génome de *H. halys* sera utile pour le développement de biopesticides respectueux de l'environnement à appliquer de concert avec des produits plus traditionnels à base de substances chimiques synthétiques (Sparks *et al.*, 2020).

De surcroît, plusieurs de ces produits de synthèse ne sont plus homologués dans certains pays dont la France, et certaines mesures réglementaires visant à réduire l'usage de plusieurs molécules sont changent régulièrement (tableau 1). Par exemple, les néonicotinoïdes sont connus pour leur action néfaste sur les pollinisateurs. Les pyréthrianoïdes, eux, ont tendance à impacter les espèces prédatrices d'*H. halys*, leur usage n'est donc pas compatible avec une approche par lutte intégrée ou de lutte biologique. Cependant, il est possible d'utiliser des pesticides à spectre étroit dans le cadre de la lutte intégrée, pour permettre une action ciblée. On retrouve notamment le novaluron et le diflubenzuron (inhibiteurs de la biosynthèse de la chitine chez *H. halys*, avec principalement un effet sur les larves), le sulfoxaflor (effet semblable à celui des néonicotinoïdes, cible plusieurs espèces de punaises), ou encore le cyclaniliprole (peu de données sur l'efficacité de ce produit).

D'après Kuhar et Kamminga (2017), il n'y a pas encore de cas de résistance de *H. halys* à des insecticides utilisés. En revanche, on se trouve ici dans le cas d'une espèce extrêmement polyphage. C'est donc une possibilité à ne pas écarter, d'autant plus que l'apparition de résistance est un processus important, déjà décrit pour d'autres espèces d'insectes. Il y a donc une nécessité croissante de trouver des solutions alternatives à l'usage de ces pesticides.

III-3 Nouvelles pistes de régulation pour *Halyomorpha Halys*

III-3-a Autres méthodes de lutte

Dans l'objectif de se passer de l'usage des pesticides synthétiques, on retrouve différentes pistes de recherches étudiées d'abord en laboratoire puis en conditions réelles de culture afin de prendre en compte les paramètres environnementaux, tels que les variations climatiques ou la présence de diverses sources de stress.

On trouve notamment des recherches basées sur l'étude du benzoate de méthyle (MB), une substance naturellement présente dans certains fruits ou plantes (pouvant être extraite à partir de jus de pomme fermenté) présentant une toxicité pour *H. halys*. Le MB est 5 à 20 fois plus toxique que les produits synthétiques précédemment évoqués. Étant considéré comme respectueux de l'environnement, il est pour le moment une piste prometteuse pour remplacer les pesticides synthétiques (Feng et Zhang, 2017).

Actuellement, l'usage d'huiles essentielles comme insecticide est à l'étude. Des travaux réalisés par Gokturk (2021) ont montré une forte efficacité de l'huile essentielle de *Satureja spicigera* (Sarriette des montagnes, plante aromatique et médicinale) sur les larves et adultes d'*H. halys* avec un taux de mortalité atteignant 87,5% à 96h après mise en contact avec le produit. Ces substances sont plus biodégradables et moins polluantes que les pesticides, mais sont cependant plus onéreuses.

Une piste se basant sur l'usage de siRNA a été mise en évidence par Ghosh et al. (2018). L'objectif ici est d'utiliser l'interférence causée par des siRNA afin d'éteindre l'expression de certains gènes chez l'insecte cible, en causant ainsi une dégradation de l'ARN endogène, entraînant in fine la mort de l'individu. Cette méthode nécessite d'injecter ces siRNA à *H. halys*, par exemple via son alimentation (*H. halys* se nourrit du phloème des plantes). Il n'est pas nécessaire de créer une plante transgénique capable de produire ces siRNA, il serait possible d'effectuer une pulvérisation directement sur les feuilles ou un épandage de granulés contenant les siRNA. Ce nouvel angle d'attaque pourrait amener au développement d'une nouvelle méthode de lutte utilisant des biopesticides.

III-3-b Lutte biologique

Lorsqu'une espèce exotique est introduite dans un nouvel environnement, les ennemis naturels présents dans cet habitat risquent de ne pas pouvoir réguler sa population. Il semble donc plus judicieux d'utiliser des agents de lutte biologique exotiques ayant évolué en même temps que le ravageur exotique en question (Scala et al., 2022). En Asie, des arthropodes prédateurs, des diptères parasitoïdes et des hyménoptères parasitoïdes oophages ont été signalés comme ennemis naturels d'*H. halys*. Les prédateurs attaquent tous les stades de développement alors que les parasitoïdes ne parasitent que les adultes et les œufs (figure 5) [1]. L'impact de la prédation est très peu connu. Les plus forts taux de parasitisme observés en Asie varient de 63 à 85% et concernent des hyménoptères oophages des genres *Trissolcus* et *Anastatus*. Plusieurs agents pathogènes ont été également observés chez *H. halys*, notamment *Ophiocordyceps nutans* (Hypocreales : Phiocordycipitaceae) et un virus intestinal de *Plautia stali* (Hemiptera :



Figure 10. Parasitoïdes sur oeufs d'*Halyomorpha halys* [6].

Anastatus bifasciatus (A), *Trissolcus basalis* (B)

Pentatomidae). En Amérique du Nord, des prédateurs de type broyeur et piqueurs-suceurs ont été identifiés lors d'études sur le terrain menées dans l'est des USA. Plusieurs familles s'attaquent aux œufs, larves et adultes d'*H. halys* : Anthocoridae (Hemiptera), Asilidae (Diptera), Chrysopidae (Neuroptera), Coccinellidae (Coleoptera), Crabronidae (Hymenoptera), Forficulidae (Dermaptera), Geocoridae (Hemiptera), Mantidae (Mantodea), Melyridae (Coleoptera) et Reduviidae (Hemiptera). Des araignées ont été également observées s'attaquant à tous les stades de développement. La mortalité des œufs imputable à des prédateurs et d'autres causes indéterminées atteint 40 à 70% dans certaines études sur le soja et le maïs, en moyenne 23% dans des pépinières ornementales et les prédateurs seuls sont responsables d'une mortalité de 25% des œufs dans des vergers de Pennsylvanie [1]. La coccinelle asiatique (*Hamonia axyridis*) et les perce-oreille (Forficulidae) sont les principaux prédateurs observés dans les vergers suivis (Pennsylvanie). Les larves d'*H. halys* constituent une forte proportion (95%) des proies déposées dans des nids de guêpes de la famille des Crabronidae. La recherche de parasitoïdes par l'exposition d'œufs sentinelles (Etats atlantiques et Orégon) a mis en évidence plusieurs espèces de Chalcididae et de Platygastriidae parasitoïdes des œufs d'*H. halys*. Toutefois les taux de parasitisme sont généralement faibles (moins de 5 %) et très variables suivant les localités, les années et les plantes hôtes. En pépinière ornementale par exemple, des moyennes de 31 % de parasitisme ont été observées sur des œufs. Le cortège de parasitoïdes diffère entre les grandes cultures et les cultures légumières comparées aux pépinières ornementales [1]. Les communautés de parasitoïdes et de prédateurs qui attaquent les œufs d'*H. halys* varient grandement suivant l'écosystème. Des œufs de tachinaires ont été observés sur les adultes d'*H. halys* mais les taux de parasitisme sont là encore négligeables. En Europe, on ne dispose que de peu de données concernant les régulations naturelles d'*H. halys*. Les prédateurs généralistes tels que les araignées, coccinelles et perce-oreilles réduisent certainement les populations. On ne dispose pas de données non plus sur la concurrence éventuelle des punaises autochtones vis-à-vis des ressources alimentaires ou des sites d'hivernation. Alors qu'en Asie, plusieurs espèces de *Trissolcus* et d'*Anastatus* parasitent de manière significative les œufs d'*H. halys*, les espèces européennes de *Trissolcus* ne semblent pas capables de se développer sur les œufs de cette punaise. Récemment, l'espèce européenne *Anastatus bifasciatus* (figure 10) a été élevée à partir d'œufs sentinelles exposés (Suisse du sud). Son impact sur les populations naturelles d'*H. halys* est en cours d'évaluation. À ce jour, nos connaissances sur les régulations naturelles d'*H. halys* sont donc très partielles. Toutefois, les premiers éléments disponibles (USA et Suisse) montrent qu'il est peu probable que les ennemis naturels présents en France puissent empêcher ou même freiner l'établissement et la dispersion d'*H. halys* [1].

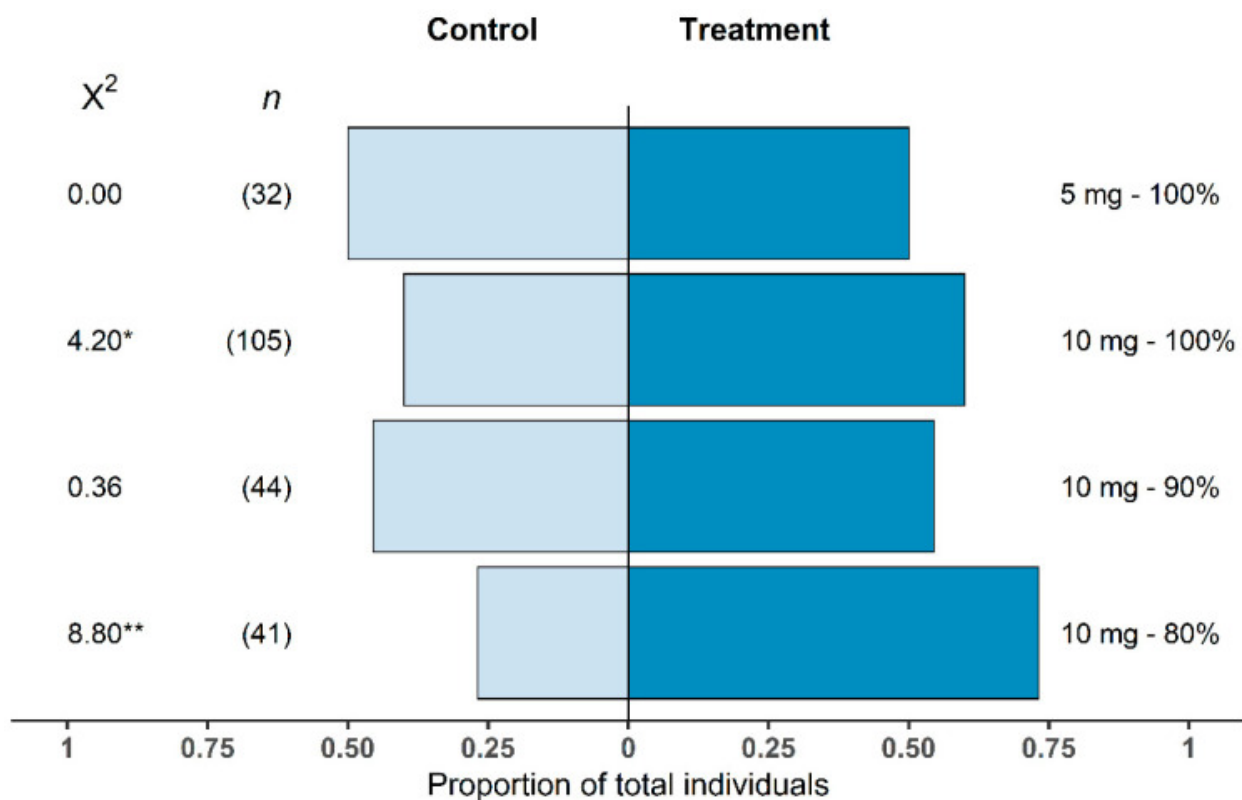


Figure 11. Réponse proportionnelle des femelles adultes de *Trissolcus japonicus* ayant choisi un leurre à la kairomone ou le contrôle (n = 32-105) au cours de la période expérimentale de 30 minutes (Richardson *et al.*, 2023).

Les traitements de leurre ont consisté en quatre combinaisons de ratio attractant (n-tridécane) / répulsif ((E)-2-décénal) et de taux de charge : 5 mg-100 % de n-tridécane, 10 mg-100 % de n-tridécane, 10 mg-90 % de n-tridécane, et 10 mg-80 % de n-tridécane. Les valeurs du chi square sont présentées (* p < 0,05 ; ** p < 0,01) et les nombres entre parenthèses représentent la taille de l'échantillon.

Les populations d'*H. halys*, dans leur aire de répartition naturelle, sont supprimées principalement par des guêpes parasitoïdes, comme *Trissolcus japonicus* (Hymenoptera : Scelionidae) et *Trissolcus mitsukurii*, s'attaquant au stade œuf (Scala et al., 2022). *T. japonicus* est le principal candidat pour la lutte biologique classique contre *H. halys*. L'efficacité de la lutte biologique classique dépend de la survie et de la conservation du parasitoïde dans l'agroécosystème (McIntosh et al., 2020). Herlihy et al. ont mis en évidence la première occurrence de *T. japonicus* aux USA en 2016. Ils ont également montré que ces parasitoïdes sont spécifiques à l'habitat : les espèces de *Trissolcus* sont significativement plus susceptibles d'être présentes dans l'habitat forestier. *T. japonicus* est un parasitoïde prometteur, cependant les climats extrêmes et de l'altitude élevée semblent peu propices à son établissement (Richardson et al., 2023). Ils ont démontré que les parasitoïdes indigènes émergent des œufs congelés significativement plus souvent que des œufs frais, alors que *T. japonicus* (exotique) n'a pas montré une différence similaire, suggérant fortement l'adaptation à *H. halys* comme hôte par *T. japonicus* mais pas par l'espèce indigène (Herlihy et al., 2016). *T. japonicus*, comme la plupart des espèces de parasitoïdes, dépend du nectar floral comme source de nourriture. Le sarrasin, la coriandre et l'aneth semblent en être les meilleures sources dans le cas de *T. japonicus*. Cependant, il reste à déterminer si ces fleurs conservent leurs avantages sur le terrain et si elles augmentent le taux de parasitisme chez *H. halys* (McIntosh et al., 2020).

Les efforts de renforcement de la lutte biologique, tels que le déploiement de kairomones de punaises pour attirer les parasitoïdes, peuvent conduire à une meilleure suppression de *H. halys*. Richardson et al. (2023) ont été testé sur le terrain et en mésocosme* (Utah, USA) des leurres expérimentaux chargés de différents mélanges et taux de libération de kairomones de punaises. Cette étude a révélé un faible taux de parasitisme sur le terrain, tandis que les essais en mésocosme ont démontré l'efficacité d'un mélange simple et double au taux de charge de 10 mg pour attirer *T. japonicus* (figure 11). Ces résultats confirment la validité de l'utilisation de septums en caoutchouc comme dispositif de libération des kairomones et fournissent une base pour les futurs travaux sur l'attraction de *T. japonicus* à l'aide de leurres dans un environnement de terrain (Richardson et al., 2023).

Des populations de *T. mitsukuri* ont été observées dans le nord de l'Italie, suggérant son utilisation dans le cadre de la lutte biologique par augmentation*. Des programmes homologues avec *T. japonicus* sont déjà en cours en Italie. Le lâcher d'un parasitoïde exotique nécessite d'étudier l'interaction entre l'agent de contrôle biologique (ACB) et l'environnement afin d'éviter les impacts négatifs sur l'entomofaune du nouvel habitat. Dans ce contexte, la préférence de *T. japonicus* et de *T. mitsukurii* entre deux punaises a été évalué. *T. japonicus* semble préférer les traces de *H. halys* libérées naturellement, tandis que *T. mitsukurii* montrait une préférence plus

marquée pour les indices chimiques naturels et synthétiques de *Nezara viridula*. Il est nécessaire de poursuivre les études pour savoir si ce parasitoïde peut être utilisé comme ACB (Scala et al., 2022).

Zapponi et al. (2020) ont surveillé la distribution des parasitoïdes d'œufs de *H. halys* indigènes (*T. japonicus* et *T. mitsukurii*) et exotiques (Trentin-Haut-Adige, Italie), où *H. halys* et les parasitoïdes sont en expansion. Ils ont enregistré dix pentatomides, sept espèces de parasitoïdes, avec le premier rapport de *T. japonicus* dans cette région et un hyperparasitoïde. *Anastatus bifasciatus* et *T. mitsukurii* sont les parasitoïdes dominants, avec une distribution différente en termes de contexte et de plantes hôtes. Le sycomore est la plante hôte qui a enregistré le plus grand nombre de masses d'œufs parasitées naturellement. *T. mitsukurii* a montré le taux de parasitisme le plus élevé (souvent trouvé en vergers de pommiers). L'émergence des parasitoïdes exotiques a montré un retard temporel par rapport aux parasitoïdes indigènes. Les individus *T. japonicus* et *T. mitsukurii* retrouvés portaient chacun un haplotype unique. Ces haplotypes ont été trouvés précédemment en 2018 dans le nord de l'Italie. Ceci soutient fortement l'adaptation des espèces exotiques de *Trissolcus* aux conditions environnementales de l'aire d'introduction (Zapponi et al., 2020). Scaccini et al. (2020) ont aussi montré de forts impacts parasitoïdes par *T. mitsukurii*. La répartition et les performances sur le terrain (Italie, nord-est) du parasitoïde des œufs de *H. halys*, *Trissolcus mitsukurii* (Ashmead) (Hymenoptera : Scelionidae), a été étudiée en comparaison avec d'autres espèces de parasitoïdes. Dans la zone d'étude, des populations adventives de *T. mitsukurii* étaient présentes depuis 2016, représentant la première détection de cette espèce en Europe. *T. mitsukurii* était le parasitoïde le plus abondant et a montré un impact parasitoïde* plus élevé par rapport aux autres espèces, c'est-à-dire *Anastatus bifasciatus* (Hymenoptera : Eupelmidae), *Trissolcus basalis* (figure 10) et *Trissolcus kozlovi* (Hymenoptera : Scelionidae). L'hyperparasitoïde *Acroclisoides sinicus* (Hymenoptera : Pteromalidae) a également été signalé. L'analyse phylogénétique de la population de *T. mitsukurii* a distingué deux clades, l'un couvrant les échantillons d'Italie, du Japon et de Chine, l'autre de Corée du Sud (Scaccini et al., 2020).

Trissolcus kozlovi a émergé à partir d'œufs de *H. halys* déposés sur le terrain (Italie du Nord) en nombre significativement plus élevé à partir d'œufs frais de *H. halys* comparé à d'autres scelionides indigènes. Élevé sur *Peribalus strictus*, *T. kozlovi* montre une longévité élevée ainsi qu'une forte adaptation aux œufs de *H. halys*. En vergers de noisetiers, *T. kozlovi* a émergé des œufs de *H. halys* après les lâchers au champ, mais n'a pas été trouvé au cours des deux années suivantes. La gamme d'hôtes de *T. kozlovi* est assez similaire à celle de *T. japonicus*. *T. kozlovi* semble juste commencer à attaquer *H. halys* en tant que nouvel hôte. Cet aspect doit être étudié

plus en détail, ainsi que les conditions environnementales favorables à *T. kozlovi*, sa répartition et son interaction possible avec *T. japonicus* (Moraglio et al., 2021).

Précédemment, 18 espèces d'hyménoptères endoparasitoïdes des genres *Anastatus* (Eupelmidae), *Trissolcus*, *Telenomus* (Scelionidae) et *Ooencyrtus* (Encyrtidae) avaient été signalées comme parasitant les œufs de *H. halys* aux USA. Plus récemment une nouvelle guêpe parasitoïde oophage de *H. halys*, *Trissolcus solocis*, a été observée aux USA. De multiples espèces de *Trissolcus* sont connues pour pondre dans les œufs de *H. halys* malgré une incapacité physiologique à s'y développer, créant ainsi un piège évolutif. *T. solocis* trouve les œufs vivants de *H. halys* acceptables en tant qu'hôtes, mais non appropriés. Il appartient au groupe d'espèces basalis, alors que les espèces capables de parasiter avec succès *H. halys* dans son aire d'origine appartiennent au groupe flavipes. Le taux de parasitisme de *T. solocis* dans les masses d'œufs sentinelles déployées était faible et une mortalité conséquente des parasitoïdes a été observée (Balusu et al., 2019b).

En Europe, des tests en laboratoire ont montré que des parasitoïdes indigènes d'œufs de pentatomes (*Trissolcus flavipes*, *Trissolcus semistriatus*, *Trissolcus scutellaris* et *Telenomus chloropus*) attaquent fréquemment les œufs de *H. halys* mais sont généralement incapables de s'y développer. Une faible proportion seulement achève son développement. L'exposition de masses d'œufs sentinelles au champ a confirmé que les parasitoïdes d'œufs indigènes attaquent aussi *H. halys* au champ. Les parasitoïdes d'œufs indigènes ne sont donc pas capables de reconnaître les œufs de *H. halys* comme non appropriés pour leur développement. Si *H. halys* s'accroissait en abondance en Europe, elle pourrait avoir un impact négatif sur les populations de parasitoïdes, entraînant ainsi indirectement un accroissement des niveaux de population de pentatomides indigènes. La même observation a récemment été faite en Amérique du Nord avec *Telenomus podisi* [1].

Tillman et al. ont montré que sur soja, en laboratoire comme sur le terrain, plus d'œufs de *H. halys* ont été parasités par *Trissolcus euschisti* (Hymenoptera : Scelionidae) s'ils étaient congelés ou réfrigérés par rapport aux œufs frais. Les masses d'œufs naturelles de *H. halys* semblent présenter un parasitisme plus élevé et une prédation plus faible que les masses d'œufs sentinelles dans le soja. Sur le terrain, aucune différence de parasitisme entre les œufs naturels de *H. halys* et les œufs sentinelles n'a été mise en évidence (Tillman et al, 2023).

Balusu et al. (2019a) ont signalé la première occurrence de *Trissolcus basalis* parasitant des œufs frais et congelés de *H. halys* (USA).

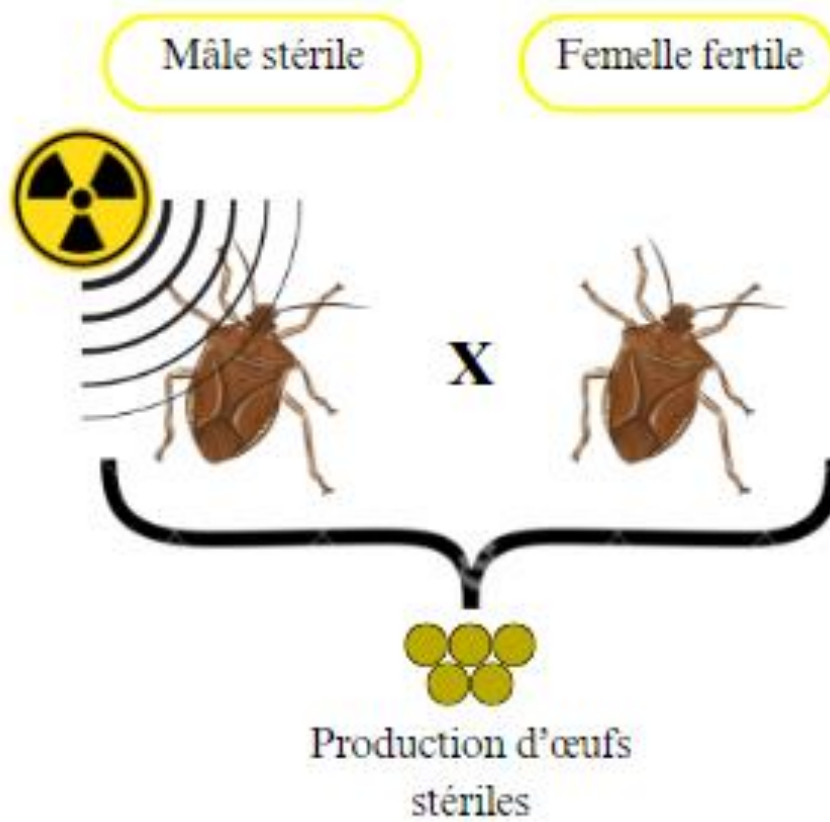


Figure 12. Concept de la SIT, d'après Welsh et al. (2017).

Nosema maddoxi infecte les populations de *H. halys* (Amérique du Nord et Asie) et entraîne une diminution du fitness des insectes. Hajek et al. (2023) ont étudié la prévalence du pathogène chez les adultes de *H. halys* avant, pendant et après l'hivernage. Aucune différence n'a été constatée dans la proportion d'individus infectés par *N. maddoxi* parmi les adultes de *H. halys* collectés sur le terrain en automne par rapport au printemps. Deux pathogènes fongiques infectent et tuent *H. halys* pendant et après l'hivernage. *N. maddoxi* était toujours plus répandu chez les insectes morts que chez ceux ayant survécu à l'hivernage. *Colletotrichum fioriniae* est signalé pour la première fois comme pathogène de *H. halys* avec des niveaux élevés d'infection trouvés parmi les insectes n'ayant pas survécu à l'hivernage. Après hivernage, les insectes survivants ont montré des niveaux d'infection par *N. maddoxi* en augmentation constante sur 50 jours (provoquant des épizooties* parmi les individus élevés dans des cages en serre après l'hivernage), mais les niveaux d'infection par *C. fioriniae* étaient plus faibles que chez les adultes morts. Ces deux pathogènes infectant *H. halys* contribuent à la mortalité pendant et après l'hivernage, expliquant une partie de la mortalité hivernale rapportée. En plus de la réduction du nombre d'*H. halys* adultes survivant pour se reproduire au printemps, les infections par *N. maddoxi* diminueraient également la fécondité des survivants (Hajek et al., 2023).

Une piste prometteuse de lutte biologique contre *H. halys* est l'usage de la technique de l'insecte stérile (SIT). Cette méthode (figure 12), consistant en la libération de mâles stériles dans les zones cibles, a déjà obtenu des résultats très concluants par le passé [8] mais n'est pas encore utilisée dans la lutte contre les hémiptères (Welsh et al., 2017). Afin de se passer de la mise en place d'élevages d'*H. halys*, il serait préférable de capturer des individus mâles déjà présents dans les cultures à l'aide de pièges. Ces mâles seraient ensuite irradiés et libérés en champs lors de la période de reproduction (figure 5) pour permettre la production d'œufs stériles après accouplement avec les femelles naturellement présentes. La dose d'irradiation est encore à l'étude. Les travaux de Suckling et al. (2019a) ont montré qu'une exposition à rayonnement gamma de 16 Gy permet d'obtenir 54,3% d'œufs stériles. Il est impératif de trouver un rayonnement suffisamment puissant pour induire un nombre élevé d'individus stériles, sans pour autant impacter négativement la durée de vie de ces individus. Nguyen et al. (2021) ont montré qu'une dose d'irradiation supérieure à 20 Gy entraîne une réduction significative de la durée de vie des mâles stériles. Ceci impacte négativement l'efficacité de la SIT. En effet, si les mâles stériles vivent moins longtemps que les mâles fertiles, les femelles auront alors statistiquement plus de chances de se reproduire avec des mâles fertiles. Cette étude met en évidence une forte baisse de l'efficacité dans l'obtention des œufs stériles (26%) en comparaison avec les résultats obtenus par Welsh et al. (2017). Cette variation pourrait être due au ratio utilisé (5 individus traités contre 1 non traité mis en contact avec les femelles) ou à la compétitivité des individus traités qui, après hivernage, semblent moins

MÉTHODE DE LUTTE actuelles / en développement	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Pièges physiques (Potentiellement couplés à des stimuli visuels et/ou olfactifs)	<ul style="list-style-type: none"> - permettent de capturer les insectes en vue d'un suivi ou de l'élevage - létaux ou non 	<ul style="list-style-type: none"> - pièges physiques seuls peu sélectifs - installations parfois coûteuses - inefficaces durant l'hivernage - insuffisants seuls pour réduire efficacement les dommages causés par <i>H. halys</i>
Pesticides synthétiques (A large spectre majoritairement)	<ul style="list-style-type: none"> - très forte efficacité - facilité d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - dangereux pour la santé humaine et l'environnement - beaucoup ne sont plus homologués en France - modifications fréquentes des réglementations encadrant l'usage de ces substances - peu utilisables dans le cadre de la lutte intégrée - risque d'apparition de résistance
Benzoate de méthyle	<ul style="list-style-type: none"> - extrait de certains fruits - peut être plus toxique que certains insecticides synthétiques à certaines concentrations - respectueux de l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> - non signalés
Huiles essentielles	<ul style="list-style-type: none"> - huile essentielle de <i>Satureja spicigera</i> - plus biodégradable que les pesticides synthétiques et donc moins de risques pour l'environnement (moins polluant) - efficacité supérieure à 80% au bout de 96h 	<ul style="list-style-type: none"> - coût potentiellement élevé
Silencing par siRNA	<ul style="list-style-type: none"> - siRNA spécifique à <i>H. halys</i>, pas de risque pour l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> - coût potentiellement élevé
Lutte biologique (Parasitoïdes / autres prédateurs)	<ul style="list-style-type: none"> - prédateurs / pathogènes naturels d'<i>H. halys</i> - nombreuses espèces à l'étude 	<ul style="list-style-type: none"> - comportement des espèces très fortement influencé par le climat/l'environnement - peu de parasitoïdes d'<i>H. halys</i> naturellement retrouvés en France - difficulté d'obtention des autorisations nécessaires au lâcher d'espèces exotiques en France
SIT	<ul style="list-style-type: none"> - utilisée avec succès sur d'autres espèces d'insectes - ne nécessite pas l'usage de molécules dangereuses ou le lâcher d'espèces exotiques 	<ul style="list-style-type: none"> - élevage des punaises difficile - comportement en laboratoire potentiellement différent du comportement en plein champ

Tableau 2. Comparaison des avantages et inconvénients propres aux différentes méthodes de lutttes actuelles et en développement contre *Halyomorpha halys*.

compétitifs que leurs concurrents non traités. La stérilité des œufs F1 attendue était de 80%, l'obtention de seulement 54,3% de stérilité montre la nécessité d'une meilleure compréhension de l'impact de l'irradiation sur la compétitivité. La SIT reste néanmoins une piste prometteuse pour limiter la taille des populations de *H. halys*, sans danger pour la santé humaine, animale et sur l'environnement (Suckling et al., 2019a).

III-3-c Suivi des Parasitoïdes

Des techniques de lutte intégrée ont été développées pour *H. halys* dans les pommiers, notamment des techniques d'application par pulvérisation. Cependant, on ne sait pas comment ces techniques affectent *T. japonicus*, sa capacité de recherche de nourriture, et sa progéniture.

Ludwick et al. (2020) ont évalué l'impact de la bifenthrine, du thiaméthoxame + λ -cyhalothrine, du clothianidine et du méthomyl sur ce parasitoïde. La survie des femelles a été significativement réduite sur les masses d'œufs post-traitement récupérées dans les zones ayant reçu des applications de bifenthrine. L'émergence des masses d'œufs après traitement a été affectée par le thiaméthoxame + λ -cyhalothrine, la bifenthrine et le méthomyl dans certaines zones traitées, alors qu'un impact moindre a été observé sur les masses d'œufs parasitées 2 et 7 jours avant le traitement en général. Ces données permettent une meilleure compréhension de la gestion d'*H. halys* ainsi que de l'impact potentiel de *T. japonicus* dans les agroécosystèmes de vergers pulvérisés (Ludwick et al., 2020), elles soulignent aussi l'importance du suivi des populations de parasitoïdes dans un contexte de lutte biologique.

Une technique efficace pour la détection et le suivi des parasitoïdes indigènes et exotiques est le déploiement de cartes jaunes autocollantes, cependant, elles attirent également des arthropodes non ciblés, réduisant l'efficacité et la précision du dépistage des parasitoïdes. Holthouse et al. (2021) ont cherché à identifier une technique de piégeage alternative efficace en comparant le nombre de guêpes parasitoïdes cibles et les prises accessoires d'arthropodes sur des cartes autocollantes jaunes et bleues (USA). Les cartes jaunes collantes ont capturé 54 à 72% plus de parasitoïdes cibles que les cartes bleues, cependant, une corrélation positive dans la capture des parasitoïdes indique que les cartes bleues détectent les parasitoïdes cibles, mais en moins grand nombre. Les cartes bleues ont capturé 31-48% moins de diptères et d'hyménoptères non ciblés que les cartes jaunes, se traduisant par une réduction du temps de traitement des cartes et des impacts sur les populations d'insectes bénéfiques. Les cartes bleues offrent donc une technique alternative aux cartes jaunes pour la surveillance des parasitoïdes de *H. halys* (Holthouse et al., 2021).

IV CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

H. halys est un ravageur très mobile, avec une reproduction rapide et une descendance conséquente, capable de fonder des colonies invasives à partir d'un nombre réduit d'individus [1]. Les mesures de contrôle actuelles n'étant pas satisfaisantes, il est crucial d'effectuer une surveillance rigoureuse de cette espèce afin d'endiguer sa dissémination.

Cette synthèse rassemble des résultats (tableau 2) de recherche internationaux, obtenus dans des climats variés. Il est important d'accorder une attention particulière à ceux obtenus dans des zones climatiques similaires à celles de la France, notamment en Suisse, en Italie ou dans les États atlantique des USA.

Aujourd'hui la méthode la plus utilisée dans la lutte contre *H. halys* est l'usage de pesticides à large spectre. Cependant, cette méthode n'est pas compatible avec la plupart des systèmes de lutte intégrée. De plus, l'usage répété de pesticides engendre un risque pour la santé humaine ainsi que pour la faune et la flore exposées. Ce danger s'explique notamment par la non-sélectivité de certaines molécules actives. En effet, certains des insecticides précédemment cités ne sont pas spécifiques à *H. halys* et déciment également des populations d'insectes non-cibles. Un autre risque conséquent lié à cette méthode de lutte est l'apparition de résistances au cours du temps chez la cible. Pour limiter l'apparition de ces résistances, il est généralement recommandé d'alterner les classes de substances actives utilisées et d'implémenter un protocole de lutte intégrée. De manière générale, il est nécessaire de développer des méthodes alternatives permettant de limiter l'usage de ces substances.

Un programme de lutte biologique par introduction d'un parasitoïde exotique semblerait être la solution la plus intéressante pour gérer durablement et sur le long terme les populations d'*H. halys*. Sur la base de leurs capacités à réguler les populations d'*H. halys* en Asie, plusieurs espèces de *Trissolcus* sont en cours d'évaluation aux USA en vue de lâchers ultérieurs. La présence de *Trissolcus basalis* est confirmée en Suisse et en Italie, sa présence sur le territoire français, ainsi que celle d'autres espèces de *Trissolcus* sont actuellement étudiées par l'INRAE [10]. Même si l'Europe échappait à des dégâts importants aux cultures, un programme de lutte biologique permettrait de limiter l'impact sociétal de l'insecte [1].

Le suivi de la prédation et du parasitisme des masses d'œufs de punaises permet de mieux comprendre les tactiques potentielles de lutte biologique. Cependant, les meilleures pratiques pour l'évaluation en laboratoire et sur le terrain du parasitisme et de la prédation des masses d'œufs requièrent plus d'attention. La collecte de masses d'œufs naturelles semble être la meilleure méthodologie pour l'évaluation sur le terrain du parasitisme des masses d'œufs de punaises. Si les

masses d'œufs naturelles ne sont pas facilement disponibles, le déploiement de masses d'œufs sentinelles réfrigérées est une bonne alternative (Tillman et al, 2023), l'élevage des punaises reste néanmoins un processus complexe. Alors que les masses d'œufs sentinelles sont très efficaces pour suivre l'arrivée d'espèces exotiques de *Trissolcus*, la collecte de masses d'œufs de punaises a fourni des données fondamentales sur les espèces végétales hôtes (Zapponi et al., 2020).

Il est important de tenir compte des contraintes liées à l'utilisation et à la commercialisation d'insectes dans le cadre de lutte biologique. Les prédateurs et parasitoïdes naturels de *H. halys* étant majoritairement originaires d'Asie tout comme elle, ne sont souvent pas naturellement présents sur les territoires où *H. halys* a été importée et où elle est devenue problématique. Si ces prédateurs ou parasitoïdes ne sont pas naturellement présents, il est alors très difficile d'obtenir une autorisation pour leur utilisation. Les autorisations d'utilisation d'insectes exogènes sont rares, et le processus est long et laborieux (études d'impacts, tests moléculaires pour prouver la présence d'un prédateur sur un territoire différent du territoire d'origine) sauf en cas d'enjeu majeur. Il semble peu probable que la lutte biologique par introduction impliquant un parasitoïde exogène soit autorisée en France. Les dégâts causés jusqu'ici par *H. halys* ne sont pas suffisamment importants pour justifier la mise en place d'un tel programme. A moins qu'un parasitoïde d'*H. halys* indigène au territoire Français ne soit efficace, ou qu'un parasitoïde exotique d'*H. halys* ne soit déjà présent en France, la lutte biologique ne semble pas être la piste à privilégier.

Compte tenu de ce dernier point, il serait alors plus judicieux de se tourner vers des techniques de piégeage plus classiques. Le piégeage physique couplé à l'utilisation de phéromones, de kairomones ou de stimuli auditifs ou visuels semble donc être plus aisément envisageable sur le court terme.

La technique de l'insecte stérile (SIT) semble envisageable et prometteuse. Elle a déjà fait ses preuves sur une trentaine d'autres espèces [8]. Les mâles récupérés via des systèmes de piégeage non-létaux pourraient servir de population à irradier pour éviter l'étape d'élevage. Cette méthode est cependant encore à l'étude dans le cas de la lutte contre *H. halys*.

Ici, Biobest® cherche à identifier et développer des solutions prometteuses adaptées aux cultures spécialisées d'extérieur (arboriculture, maraîchage, vignes...), présentant généralement une plus faible valeur ajoutée que les cultures en serre. Il est donc impératif d'identifier des méthodes peu onéreuses et adaptées à l'usage en champ.

V BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE

V-a Bibliographie

Balusu, R. R., Talamas, E. J., Cottrell, T. E., Toews, M. D., Blaauw, B. R., Sial, A. A., Buntin, D. G., Fadamiro, H. Y. and Tillman, G. (2019a). First record of *Trissolcus basalis* (Hymenoptera: Scelionidae) parasitizing *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in the United States. *Biodivers Data J* **7**, e39247.

Balusu, R. R., Cottrell, T. E., Talamas, E. J., Toews, M. D., Blaauw, B. R., Sial, A. A., Buntin, D. G., Vinson, E. L., Fadamiro, H. Y. and Tillman, G. P. (2019b). New record of *Trissolcus solocis* (Hymenoptera: Scelionidae) parasitising *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in the United States of America. *Biodivers Data J* e30124.**Feng, Y. and Zhang, A.** (2017). A Floral Fragrance, Methyl Benzoate, is An Efficient Green Pesticide. *Sci Rep* **7**, 42168.

Ghosh, S. K. B., Hunter, W. B., Park, A. L. and Gundersen-Rindal, D. E. (2018). Double-stranded RNA Oral Delivery Methods to Induce RNA Interference in Phloem and Plant-sap-feeding Hemipteran Insects. *J Vis Exp* 57390

Gokturk, T. (2021). Chemical composition of *Satureja spicigera* essential oil and its insecticidal effectiveness on *Halyomorpha halys* nymphs and adults. *Z Naturforsch C J Biosci* **76**, 451–457.

Hajek, A. E., Brandt, S. N., González, J. B. and Bergh, J. C. (2023). Entomopathogens infecting brown marmorated stink bugs before, during, and after overwintering. *J Insect Sci* **23**, 8.

Herlihy, M. V., Talamas, E. J. and Weber, D. C. (2016). Attack and Success of Native and Exotic Parasitoids on Eggs of *Halyomorpha halys* in Three Maryland Habitats. *PLoS One* **11**, e0150275.

Kuhar, T. P. and Kamminga, K. (2017). Review of the chemical control research on *Halyomorpha halys* in the USA. *J Pest Sci* **90**, 1021–1031.

Leskey, T. C., Andrews, H., Bády, A., Benvenuto, L., Bernardinelli, I., Blaauw, B., Bortolotti, P. P., Bosco, L., Di Bella, E., Hamilton, G., et al. (2021). Refining Pheromone Lures for the Invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) Through Collaborative Trials in the United States and Europe. *J Econ Entomol* **114**, 1666–1673.

Leskey, T. C., Lee, D.-H., Short, B. D. and Wright, S. E. (2012). Impact of Insecticides on the Invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae): Analysis of Insecticide Lethality. *jnl. econ. entom.* **105**, 1726–1735.

- McIntosh, H. R., Skillman, V. P., Galindo, G. and Lee, J. C.** (2020). Floral Resources for *Trissolcus japonicus*, a Parasitoid of *Halyomorpha halys*. *Insects* **11**, 413.
- Hoebeke, E. and Carter, M.** (2003). *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae): a polyphagous plant pest from Asia newly detected in North America.
- Holthouse, M. C., Spears, L. R. and Alston, D. G.** (2021). Comparison of Yellow and Blue Sticky Cards for Detection and Monitoring Parasitoid Wasps of the Invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *J Insect Sci* **21**, 1.
- Ludwick, D. C., Patterson, J., Leake, L. B., Carper, L. and Leskey, T. C.** (2020). Integrating *Trissolcus japonicus* (Ashmead, 1904) (Hymenoptera: Scelionidae) into Management Programs for *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae) in Apple Orchards: Impact of Insecticide Applications and Spray Patterns. *Insects* **11**, 833.
- Moraglio, S. T., Tortorici, F., Visentin, S., Pansa, M. G. and Tavella, L.** (2021). *Trissolcus kozlovi* in North Italy: Host Specificity and Augmentative Releases against *Halyomorpha halys* in Hazelnut Orchards. *Insects* **12**, 464.
- Morrison, W. R., Acebes-Doria, A., Ogburn, E., Kuhar, T. P., Walgenbach, J. F., Bergh, J. C., Nottingham, L., Dimeglio, A., Hipkins, P. and Leskey, T. C.** (2017a). Behavioral Response of the Brown Marmorated Stink Bug (Hemiptera: Pentatomidae) to Semiochemicals Deployed Inside and Outside Anthropogenic Structures During the Overwintering Period. *J Econ Entomol* **110**, 1002–1009.
- Morrison, W. R., Cullum, J. P. and Leskey, T. C.** (2015). Evaluation of Trap Designs and Deployment Strategies for Capturing *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *J Econ Entomol* **108**, 1683–1692.
- Morrison, W. R., Milonas, P., Kapantaidaki, D. Evr., Cesari, M., Di Bella, E., Guidetti, R., Haye, T., Maistrello, L., Moraglio, S. T., Piemontese, L., et al.** (2017b). Attraction of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) haplotypes in North America and Europe to baited traps. *Sci Rep* **7**, 16941.
- Nguyen, H. N., Stringer, L. D. and Hong, K.-J.** (2021). Influence of Irradiation on the Biology of the Brown Marmorated Stink Bug (Hemiptera: Pentatomidae). *J Econ Entomol* **114**, 1211–1218.
- Polajnar, J., Maistrello, L., Bertarella, A. and Mazzoni, V.** (2016). Vibrational communication of the brown marmorated stink bug (*Halyomorpha halys*). *Physiol. Entomol.* **41**, 249–259.

- Richardson, K. V., Alston, D. G. and Spears, L. R.** (2023). Efficacy of Kairomone Lures to Attract Parasitoids of *Halyomorpha halys*. *Insects* **14**, 125.
- Rondoni, G., Chierici, E., Marchetti, E., Nasi, S., Ferrari, R. and Conti, E.** (2022). Improved Captures of the Invasive Brown Marmorated Stink Bug, *Halyomorpha halys*, Using a Novel Multimodal Trap. *Insects* **13**, 527.
- Scaccini, D., Falagiarda, M., Tortorici, F., Martinez-Sañudo, I., Tirello, P., Reyes-Domínguez, Y., Gallmetzer, A., Tavella, L., Zandigiaco, P., Duso, C., et al.** (2020). An Insight into the Role of *Trissolcus mitsukurii* as Biological Control Agent of *Halyomorpha halys* in Northeastern Italy. *Insects* **11**, 306.
- Scala, M., Fouani, J. M., Zapponi, L., Mazzoni, V., Wells, K. E., Biondi, A., Baser, N., Verrastro, V. and Anfora, G.** (2022). Attraction of Egg Parasitoids *Trissolcus mitsukurii* and *Trissolcus japonicus* to the chemical cues of *Halyomorpha halys* and *Nezara viridula*. *Insects* **13**, 439.
- Sparks, M. E., Bansal, R., Benoit, J. B., Blackburn, M. B., Chao, H., Chen, M., Cheng, S., Childers, C., Dinh, H., Doddapaneni, H. V., et al.** (2020). Brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys* (Stål), genome: putative underpinnings of polyphagy, insecticide resistance potential and biology of a top worldwide pest. *BMC Genomics* **21**, 227.
- Suckling, D. M., Cristofaro, M., Roselli, G., Levy, M. C., Cemmi, A., Mazzoni, V., Stringer, L. D., Zeni, V., Ioriatti, C. and Anfora, G.** (2019a). The Competitive Mating of Irradiated Brown Marmorated Stink Bugs, *Halyomorpha halys*, for the Sterile Insect Technique. *Insects* **10**, 411.
- Suckling, D. M., Levy, M. C., Roselli, G., Mazzoni, V., Ioriatti, C., Deromedi, M., Cristofaro, M. and Anfora, G.** (2019b). Live Traps for Adult Brown Marmorated Stink Bugs. *Insects* **10**, 376.
- Suckling, D. M., Mazzoni, V., Roselli, G., Levy, M. C., Ioriatti, C., Stringer, L. D., Zeni, V., Deromedi, M. and Anfora, G.** (2019c). Trapping Brown Marmorated Stink Bugs: “The Nazgûl” Lure and Kill Nets. *Insects* **10**, 433.
- Tillman, P. G., Grabarczyk, E. E., Balusu, R., Kesheimer, K., Blaauw, B., Sial, A., Vinson, E. and Cottrell, T. E.** (2023). Predation and parasitism of naturally occurring and sentinel stink bug egg masses of *Halyomorpha halys* (Stål) and *Nezara viridula* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae) in various southeastern habitats. *J Insect Sci* **23**, 9.

Weber, D. C., Leskey, T. C., Walsh, G. C. and Khrimian, A. (2014). Synergy of Aggregation Pheromone With Methyl (*E,E,Z*)-2,4,6-Decatrienoate in Attraction of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *J Econ Entomol* **107**, 1061–1068.

Welsh, T. J., Stringer, L. D., Caldwell, R., Carpenter, J. E. and Suckling, D. M. (2017). Irradiation biology of male brown marmorated stink bugs: is there scope for the sterile insect technique? *Int J Radiat Biol* **93**, 1357–1363.

William R. Morrison, John P. Cullum, Tracy C. Leskey. (2015) Evaluation of Trap Designs and Deployment Strategies for Capturing *Halyomorpha halys*. *Journal of Economic Entomology* **108**, 4.

Zapponi, L., Bon, M. C., Fouani, J. M., Anfora, G., Schmidt, S. and Falagiarda, M. (2020). Assemblage of the Egg Parasitoids of the Invasive Stink Bug *Halyomorpha halys*: Insights on Plant Host Associations. *Insects* **11**, 588.

V-b Sitographie

[1] **Analyse de risque phytosanitaire express *Halyomorpha halys* - la punaise diabolique - Anses**, <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-l%E2%80%99anses-relatif-%C3%A0-%C2%AB-la-r%C3%A9alisation-d%E2%80%99une-analyse-de-risque-phytosanitaire> (*Consulté le 21/12/23*).

[2] **Biobest France | LinkedIn**, <https://www.linkedin.com/company/biobest-france/>. (*Consulté le 26/12/23*).

[3] **INRAE - Historique de l'invasion**, <https://ephytia.inrae.fr/fr/C/20533/Agiir-Historique-de-l-invasion> (*Consulté le 19/01/2024*).

[4] ***Halyomorpha halys*** (2023). *Wikipédia*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Halyomorpha_halys. (*Consulté le 07/11/23*).

[5] **Présentation | Biobest Biobest Group**, <https://www.biobestgroup.com/fr/presentation>. (*Consulté le 23/12/23*).

[6] **Agiir - Reconnaître la punaise diabolique**, <https://ephytia.inrae.fr/fr/C/27104/Agiir-Reconnaitre-la-punaise-diabolique>. (*Consulté le 12/01/24*).

[7] **Host Plants of the Brown Marmorated Stink Bug in the U.S. - StopBMSB.org**, https://www.stopbmsb.org/where-is-bmsb/host-plants/#host_plants_table. (*Consulté le 12/01/24*).

[8] **INRAE - La technique de l'insecte stérile au service des agroécosystèmes français**, <https://www.inrae.fr/actualites/technique-linsecte-sterile-au-service-agroecosystemes-francais>.
(Consulté le 10/01/2024).

[9] **ephy** | <https://ephy.anses.fr/> . (Consulté le 01/02/2024).

[10] **La Punaise diabolique Halyomorpha halys** https://herault.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/Productions_techniques/SudArbo21-Punaise-diabolique-ca342021.pdf?fbclid=IwAR1Eh08ZOGGVnDLtNJmfKaSPGWjlFkH9eQ4OcrQIQ0DSC92tB4-42fpuQ5c. (Consulté le 04/02/2024).