

## Article

# Suppression sur le terrain de la drosophile à ailes tachetées (SWD) (*Drosophila suzukii* Matsumura) en utilisant la technique de l'insecte stérile (SIT)

Raphaël A. Homem<sup>1,\*</sup>, Zeus Mateos-Fierro<sup>1</sup>, Rory Jones<sup>2,3</sup>, Daniel Gilbert<sup>1</sup>, Andrew R. McKemey<sup>4</sup>, Glen Slade<sup>1</sup> et Michelle T. Fontaine<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> BigSis, 5 Weighbridge Row, Cardiff Road, Reading RG1 8LX, Royaume-Uni ; zeus@bigsis.tech (ZM-F.); dan@bigsis.tech (DG); glen@bigsis.tech (GS)
  - <sup>2</sup> NIAB EMR, New Road, East Malling, Kent ME19 6BJ, Royaume-Uni ; r.jones26@live.co.uk (RJ); michelle.fountain@niab.com (MTF)
  - <sup>3</sup> Berry Garden Growers, Tatlingbury Oast, Tonbridge, Kent TN12 6RG, Royaume-Uni
  - <sup>4</sup> Independent Co., Ltd., Oxford OX2 9AF, Royaume-Uni ; andy.mckemey@gmail.com
- \* Correspondance : rafael@bigsis.tech

**Résumé simplifié :** La drosophile à ailes tachetées (SWD) (*Drosophila suzukii*) est un insecte ravageur d'importance économique qui peut causer des dégâts importants à une large gamme de fruits à baies et à noyaux. Les producteurs utilisent actuellement des insecticides chimiques et une gestion culturale à forte intensité de main-d'œuvre pour réduire l'impact économique de la DAT. La technique des insectes stériles (SIT) est une méthode de lutte contre les insectes sans produits chimiques, respectueuse de l'environnement et éprouvée : les mâles stériles sont relâchés dans une zone spécifique, où ils s'accouplent avec des femelles sauvages, qui ne produisent alors pas ou très peu de progéniture. Cette étude visait à démontrer, pour la première fois, l'utilisation de la SIT pour contrôler la DAT dans des conditions de terrain sans barrières physiques qui pourraient empêcher de manière significative l'invasion de la DAT sauvage ou la fuite des mâles stériles. Des essais ont été menés dans des polytunnels ouverts, qui sont connus pour être extrêmement susceptibles d'envahir le DAT contrairement aux serres, où l'enceinte minimise la pression SWD. Des SWD mâles ont été rendus stériles à 99 % à l'aide de rayons X et relâchés deux fois par semaine dans un site de 7,2 ha cultivant des fraises remontantes. La méthode a permis d'obtenir un contrôle tout au long de la saison avec une suppression allant jusqu'à 91 % par rapport à deux sites témoins non traités. Nous avons également étudié comment la population de DAT sauvage variait tout au long de la saison et la longévité du DAT mâle stérile relâché. Cette étude suggère que la SIT peut être une alternative très efficace et écologiquement durable aux insecticides chimiques pour le contrôle de la DAT dans des conditions commerciales. Il a également fourni des informations pour aider à optimiser le déploiement pratique de l'outil. La méthode a permis d'obtenir un contrôle tout au long de la saison avec une suppression allant jusqu'à 91 % par rapport à deux sites témoins non traités. Nous avons également étudié comment la population de DAT sauvage variait tout au long de la saison et la longévité du DAT mâle stérile relâché. Cette étude suggère que la SIT peut être une alternative très efficace et écologiquement durable aux insecticides chimiques pour le contrôle de la DAT dans des conditions commerciales. Il a également fourni des informations pour aider à optimiser le déploiement pratique de l'outil.



**Citation:** Homem, RA; Mateos-Fierro, Z.; Jones, R.; Gilbert, D.; McKemey, AR; Slade, G.; Fontaine, MT. Suppression sur le terrain de la drosophile à ailes tachetées (SWD) (*Drosophila suzukii* Matsumura) en utilisant la technique de l'insecte stérile (SIT). *Insectes* **2022**, *13*, 328. <https://doi.org/10.3390/insects13040328>

Éditeur académique : Mariana F. Wolfner

Reçu : 28 janvier 2022

Accepté : 23 mars 2022

Publié : 26 mars 2022

**Note de l'éditeur :** MDPI reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.



**Droits d'auteur :** © 2022 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstrait :** *Drosophila suzukii* (la drosophile à ailes tachetées (SWD)) est un ravageur économiquement important des fruits rouges et à noyau dans le monde entier. La lutte repose sur des insecticides à large spectre, qui ne sont ni totalement efficaces ni écologiquement durables. La technique des insectes stériles (SIT) est un outil de lutte antiparasitaire éprouvé, efficace et respectueux de l'environnement. Ici, nous avons étudié, pour la première fois, le potentiel de l'utilisation de SIT pour contrôler *D. suzukii* dans des conditions de terrain sans barrières physiques qui limitent l'invasion des insectes. Une méthode exclusive d'élevage et d'irradiation aux rayons X a été utilisée pour obtenir des mâles > 99 % stériles. Des mâles stériles ont été relâchés deux fois par semaine d'avril à octobre 2021 sur un site du Kent, au Royaume-Uni, où des fraises remontantes étaient cultivées dans des polytunnels ouverts. L'infestation de femelles sauvages *D. suzukii* a été surveillée chaque semaine à l'aide de pièges collants rouges avec leurre sec sur le site traité et sur deux sites témoins similaires qui n'ont pas reçu de lâchers de mâles stériles. Les lâchers de mâles stériles ont supprimé la femelle sauvage *D. suzukii* jusqu'à 91 % de la population par rapport aux sites témoins. Nous avons ainsi démontré la faisabilité de la SIT pour contrôler tout au long de la saison *D. suzukii* en utilisant des lâchers précoces, soutenus et dynamiquement ciblés de mâles stériles. Cela fournit une méthode prometteuse et respectueuse de l'environnement pour lutter contre cet important ravageur.

**Mots clés :** biodiversité; marquage-libération-recapture ; lutte intégrée contre les nuisibles; framboise; fraise; cerise; ravageur des cultures; la fertilité; longévité; durabilité

## 1. Introduction

*Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera : Drosophilidae) est un ravageur économiquement important originaire d'Asie du Sud-Est et qui s'est récemment propagé à l'échelle mondiale. Il a atteint l'Amérique du Nord (États-Unis et Canada) et l'Europe, y compris l'Espagne et l'Italie, en 2008 et a été détecté pour la première fois au Royaume-Uni en 2012 [1–3]. Contrairement à la grande majorité des *Drosophila* espèces, *D. suzukii* a la capacité de pondre dans une large gamme de fruits mous et à noyau mûrissants (par exemple, fraise et cerise), grâce à un ovipositeur dentelé morphologiquement modifié qui permet de pondre des œufs dans des fruits mûrissants [4]. Les œufs éclosent en larves, qui se développent à l'intérieur du fruit, rendant le produit invendable, causant ainsi des pertes économiques importantes [5]. Les plaies de ponte fournissent également des points d'entrée pour des infections secondaires par des micro-organismes et d'autres insectes, causant ainsi des dommages économiques encore plus importants aux cultures fruitières [6,7]. Par exemple, dans trois États américains, des pertes de plus de 500 millions de dollars en 2008 ont été attribuées à *D. suzukii* [1].

Actuellement, *D. suzukii* lutte repose sur l'application d'insecticides parallèlement aux méthodes de lutte culturale, en particulier une récolte plus fréquente, une meilleure hygiène et l'utilisation de filets d'exclusion des insectes [8]. Le nombre limité d'ingrédients chimiques actifs approuvés, le potentiel de restrictions réglementaires sur certains d'entre eux et la menace de résistance aux insecticides constituent une menace pour *D. suzukii* contrôler. Récemment, la résistance au spinosad a été détectée dans la nature *D. suzukii* populations aux États-Unis [9]. Des stratégies de lutte efficaces, moins dépendantes des intrants insecticides, sont donc nécessaires pour parvenir à une gestion intégrée des ravageurs (IPM).

La technique des insectes stériles (SIT) est un outil de lutte antiparasitaire respectueux de l'environnement qui a été appliqué pour contrôler plusieurs ravageurs d'importance économique [dix]. Bien que le concept d'utilisation de mâles stériles pour contrôler les populations naturelles d'insectes ait été proposé indépendamment par différents chercheurs [11–13], c'était Knippling [13]—encouragé par le travail de pionnier de GA Runner [14] et HJ Muller [15]—qui a proposé que les rayonnements ionisants pourraient induire la stérilité sexuelle chez les mâles de la mouche du ver à vis du nouveau monde, *Cochliomyia hominivorax* (Coquerel), un ravageur du bétail très destructeur [16]. Bushland et Hopkins [17] a encore optimisé les doses et les conditions de rayonnement dans les expériences de laboratoire et le premier essai sur le terrain SIT au monde a eu lieu sur deux petites îles (Sanibel et Captiva Island), au large de la côte ouest de la Floride, aux États-Unis, en 1953 [18].

Depuis lors, la SIT a été utilisée contre des dizaines d'espèces et sur six continents, à la fois pour la suppression et l'éradication d'espèces nuisibles [19]. Des études récentes en laboratoire ont fourni des résultats encourageants concernant la faisabilité potentielle de l'utilisation de la SIT comme outil de *D. suzukii* contrôler. Recherche sur les systèmes d'élevage en masse optimisés [20], détermination des doses de rayonnement optimales pour la stérilité [21,22] et l'impact des radiations sur *D. suzukii* Fitness [23,24] ont été publiés. De plus, on connaît déjà beaucoup de choses sur la biologie et le comportement des *D. suzukii*. Comprendre la biologie et l'écologie du ravageur peut permettre les meilleures utilisations de la SIT pour *D. suzukii* contrôler.

La durée de vie de *D. suzukii* dans des conditions de laboratoire est d'environ 20 à 60 jours et diffère considérablement d'une étude à l'autre, certains rapports montrant que les mouches peuvent survivre jusqu'à 160 jours dans des conditions spécifiques [25]. On en sait moins sur la durée de vie *D. suzukii* dans des conditions de terrain ; il a été démontré que les mouches vivaient entre 21 et 66 jours dans les vergers de cerisiers pendant les mois de mai à août au Japon [26]. Pour survivre aux basses températures pendant les mois d'hiver dans certaines parties du monde, *D. suzukii* subit une diapause reproductive, passant à un phénotype de morphe hivernal. Cette transition est principalement déclenchée par la température [27], les adultes résultants étant plus gros et d'apparence plus foncée [28] et plus tolérant au froid [29]. La prévalence du phénotype de la forme hivernale augmente dans les derniers stades de la saison de croissance, atteignant ~ 99 % en décembre aux Pays-Bas [30]. On pense également que cette transition morphologique s'accompagne d'une dispersion dans des habitats semi-sauvages, tels que les haies et les bois, où les mouches peuvent bénéficier d'un abri dans des microclimats tels que la litière de feuilles pour les aider à éviter les températures extrêmes [31,32]. Au début de la saison de croissance des fruits suivante, les femelles hivernantes entrent dans les cultures pour pondre leurs œufs dans les fruits hôtes [30].

Le but de cette étude était de déterminer si et comment la SIT pouvait être utilisée pour supprimer *D. suzukii* dans un environnement commercial où les barrières physiques n'empêchaient pas *D. suzukii* incursion. Cela a été testé par des versions régulières et dynamiquement ciblées de stériles

Masculin *D. suzukii* en une culture commerciale de fraises cultivées dans des tunnels ouverts et l'habitat environnant. Le site avait une histoire antérieure de *D. suzukii* infestation et mâle stérile *D. suzukii* ont été relâchés avant le début de la *D. suzukii* activité au printemps 2021 (semaine 15) jusqu'à la fin de la récolte (semaine 41) à l'automne 2021.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Conditions d'élevage de *Drosophila suzukii*

Le *D. suzukii* colonie provenait de mouches sauvages collectées au NIAB EMR (Kent, Royaume-Uni) sur des cerises infestées en 2019. La culture a été maintenue pendant 30 × 30 × 30 cm cages de 30 cm avec une population moyenne d'environ 4 000 à 6 000 *D. suzukii* par cage au NIAB EMR et, depuis octobre 2020, également au BigSis (Reading, UK). Les conditions d'élevage étaient 16 L:8 D photopériode, 24 °C ( $\pm 2$  °C) et 65 % d'humidité relative. *Drosophila suzukii* ont été maintenus avec une modification *D. suzukii* milieu de semoule de maïs-gélose contenant 0,8 % de gélose, 8 % de semoule de maïs (polenta grossière biologique), 10 % de sucre cristallisé, 4 % de levure sèche instantanée de boulanger (*Saccharomyces cerevisiae*) et 0,3 % d'acide propionique.

### 2.2. Production de *D. suzukii* mâle stérile

Pour des raisons de protection commerciale, le processus de production et de stérilisation des *D. suzukii* n'est pas entièrement décrit dans cet article, qui se concentre sur la suppression des *D. suzukii*. Cependant, les méthodes de production stériles *D. suzukii* sont décrites ailleurs [21,22]. Les mâles utilisés pour l'essai ont été stérilisés aux rayons X, après avoir été sélectionnés manuellement avec des pinceaux fins sur des tampons anti-mouches sous CO<sub>2</sub> anesthésique (Flystuff 59—122B Benchtop Flowbuddy Complete system; Genesee Scientific, San Diego, CA, USA) connecté à des barboteurs d'eau (Flystuff 59—180 CO<sub>2</sub> barboteur sur flacon de 500 ml avec un bouchon en caoutchouc n° 7) pour empêcher les mâles de se déshydrater. Les mâles stériles ont été marqués avec des poudres fluorescentes UV (S-2800 Series Water-Based Acrylic Paint; Bioquip products, Inc., Compton, CA, USA; couleurs utilisées—jaune, bleu, rouge et orange) [33] pour permettre l'identification lors de la recapture. Les mâles marqués stériles ont été comptés et des groupes de 100 ont été placés dans des flacons (tubes en polypropylène à fond plat; 152 mm de longueur x 26 mm de diamètre) contenant environ 5 mL de milieu sugaragar (2 % p/v gélose, 5 % p/v saccharose, 0,3 % v/v acide acétique). Les flacons ont été conservés à température ambiante (~20 °C) jusqu'à la libération, entre trois et sept jours après le tri.

### 2.3. Test de validation de la stérilité

Pour vérifier la stérilité des mouches, des mâles irradiés et non irradiés ont été placés individuellement dans des flacons contenant environ 5 ml de milieu de semoule de maïs-agar, 40 flacons au total, 20 avec des mâles irradiés et 20 avec des mâles non irradiés. Pour augmenter la probabilité d'accouplement et le nombre d'œufs collectés dans les flacons, trois femelles vierges ont été ajoutées à chaque flacon contenant un seul mâle. Les mouches ont été autorisées à récupérer du CO<sub>2</sub> anesthésie pendant 48 h, puis transférés dans de nouveaux flacons contenant des milieux de semoule de maïs-agar teints avec du colorant alimentaire naturel rouge (The Pantry Red Food Colouring, 6 ml de colorant par litre de régime) pour faciliter l'identification et le comptage des œufs pondus. Après 24 h, toutes les mouches ont été retirées des flacons et le nombre d'œufs a été compté pour obtenir la fécondité (nombre d'œufs pondus par femelle par 24 h). Des flacons contenant des œufs ont été incubés pendant dix jours à 24 °C ( $\pm 2$  °C), photopériode 16 L:8 D et 65 % HR et le nombre d'œufs qui ont éclos et sont devenus des pupes a été compté pour calculer la fertilité des mâles (pourcentage d'œufs qui ont produit des pupes).

Une procédure similaire a été répétée au cours des rejets en utilisant des mouches prélevées au hasard dans les flacons de rejet. Au moins 30 mâles irradiés ont été sélectionnés à chaque fois et ceux-ci ont été répartis en groupes de 10 par flacon. Un total de 10 femelles vierges ont été ajoutées à chaque flacon. Un tableau indiquant le nombre d'œufs et de pupes générés, la fécondité moyenne et la fertilité moyenne des mouches échantillonnées au cours de l'essai est présenté dans le tableau supplémentaire S1.

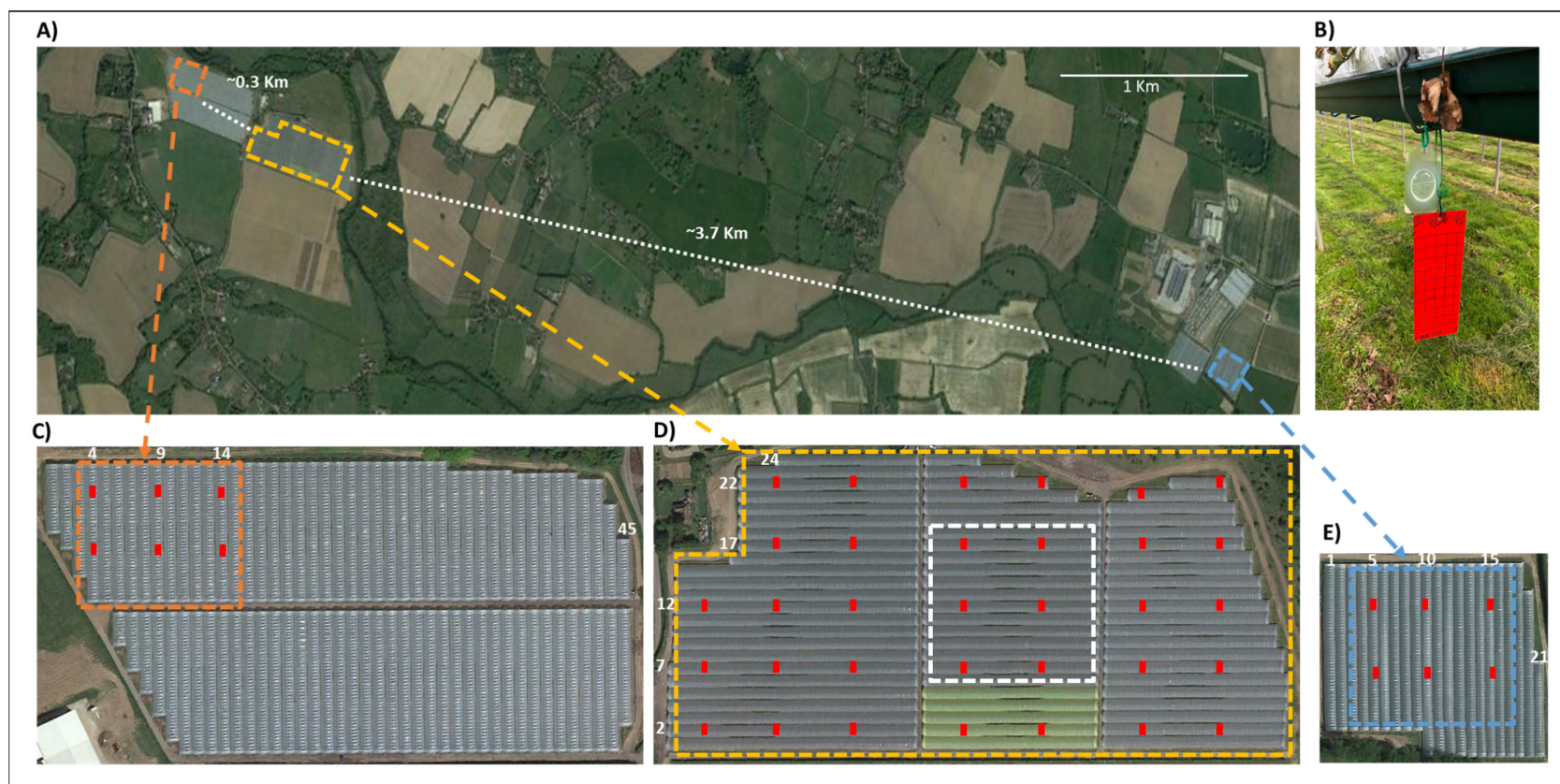
#### 2.4. Sites d'étude et versions

L'étude a été menée dans trois fraisiers commerciaux (*Fragaria x ananas*) sites de terrain dans le Kent, au Royaume-Uni (Figure 1). Les sites témoins ont été sélectionnés parmi des champs de cultures comparables disponibles sur la base de données historiques fournies par le *D. suzuki* programme de surveillance. Les trois sites avaient historiquement des *D. suzuki* niveaux d'infestation basés sur les données disponibles de captures hebdomadaires de 1 à 2 pièges à appâts liquides au cours des 3 années précédant l'essai (2018-2020), à l'exception du site témoin 1 non traité, pour lequel les données n'étaient disponibles que pour 2019 et 2020. Ces données ne permettent pas une comparaison robuste entre les sites mais confirment, notamment par rapport aux autres sites considérés, une caractéristique d'infestation similaire. La figure supplémentaire S1 présente le nombre moyen de *D. suzuki* (mâles et femelles) capturés dans ces pièges au cours des saisons précédentes. Le paysage environnant des trois sites se composait de champs de fraises, de terres arables et de haies, y compris *Rubus* spp. Les différents profils de chaque site peuvent avoir affecté la dynamique d'invasion des refuges d'hivernage ; cependant, les données historiques suggèrent que l'effet net était globalement comparable.

Le site traité était situé à environ 0,3 km du site témoin 1 et à 3,7 km du site témoin 2 (Figure 1 UN). Les trois sites appartenaient à la même entreprise et ont reçu une gestion similaire, y compris un système de culture sur table (~ 1,3 m au-dessus du sol), des polytunnels ouverts, des agents de lutte biologique, des ruches pour augmenter la pollinisation et des pulvérisations de pesticides chimiques contre les insectes nuisibles et les maladies. Le tableau supplémentaire S2 montre les dates d'application, le nom du produit, l'ingrédient actif et les taux d'application de tous les insecticides chimiques utilisés dans les trois sites au cours de l'essai. Le sol des polytunnels n'était traité d'aucun revêtement plastique et était dominé par une couverture de graminées. Des fraisiers (cv Zara; remontant) ont été plantés dans des sacs de culture en coco en avril 2021 et retirés à la fin de la saison (octobre). Chaque polytunnel comprenait 5 ou 6 rangées de dessus de table avec des sacs de culture en coco, soit un total d'environ 52 000 plantes par ha. La taille du site traité par SIT était de 7,5 ha et il contenait 70 tunnels de longueurs variables. Ceux-ci étaient répartis en 22 rangées de 3 blocs de tunnels chacune et 2 rangées de 2 blocs de tunnels (24 rangées au total). Le site témoin non traité 1 était une zone de 1,4 ha choisie dans un champ contenant 85 tunnels disposés en 2 blocs, 1 avec 45 et un autre avec 40 tunnels (45 rangées au total). Le site témoin non traité 2 était une zone de 1,4 ha dans un champ contenant 21 tunnels dans un seul bloc.

Le site traité a reçu du mâle stérile *D. suzuki* des lâchers bihebdomadaires (site traité par SIT), tandis que les deux autres sites (sites témoins non traités 1 et 2) ont été gérés de la même manière pour le contrôle des ravageurs et des maladies, mais sans mâle stérile *D. suzuki* versions. Les lâchers de mâles stériles sur le site traité ont commencé en avril (semaine 15) et se sont poursuivis jusqu'en octobre (semaine 41), lorsque la récolte s'est terminée. Deux sorties étaient réalisées par semaine. Chaque mardi, des mouches étaient relâchées dans des tunnels en rangées impaires; le vendredi, les mouches étaient relâchées dans les tunnels en rangées paires. Les mâles stériles étaient répartis uniformément dans les tunnels. Des mouches stériles ont également été relâchées dans le périmètre (entourant les haies à moins de 20 m du polytunnel) les deux jours. Pour chaque rejet, généralement 30 % des flacons étaient réservés pour un rejet dans le périmètre (tableau supplémentaire S3). La distance entre les points de lâcher variait de 30 à 60 m selon le nombre de mouches relâchées. Les mâles stériles ont été libérés manuellement des flacons (100 mâles par flacon), initialement ~ 9000 mâles par semaine (à la mi-avril), augmentant progressivement à environ 60,000 mâles par semaine en octobre. En règle générale, 20 % des mouches stériles relâchées au cours d'une journée donnée étaient ciblées sur des zones où le piégeage avait identifié des infestations plus élevées d'espèces sauvages *D. suzuki* dans les jours précédents.





**Figure 1.** Position relative des champs de fraises expérimentaux et des pièges de surveillance dans les champs. **(UN)** Image satellite de la région du Kent, Royaume-Uni, mettant en évidence la position des sites de contrôle traités par SIT (lignes pointillées jaunes) et non traités (site 1 - lignes pointillées orange ; site 2 - lignes pointillées bleues). La distance entre les sites est également indiquée. **(B)** Piège gluant rouge avec un leurre sec (Russell IPM) utilisé pour surveiller l'abondance de DAT femelles sauvages dans les trois sites. Leur positionnement est indiqué par des rectangles rouges sur les images des sites individuels. **(C)** Contrôlez le site 1 et la position de six pièges collants rouges répartis dans trois tunnels. **(ré)** site traité SIT et la position de 33 pièges répartis sur 16 tunnels. **(E)** Contrôlez le site 2 et la position de six pièges collants rouges répartis dans trois tunnels. Les pièges étaient équidistants sur les 3 sites, ~50 m à l'intérieur des rangées de polytunnels et 5 polytunnels espacés (~40 m) les uns des autres. Le rectangle blanc dans **(ré)** représente une « zone centrale » de 1,4 ha, qui a été reproduite dans chacun des sites témoins. Les photos ont été extraites de Google Earth.

### 2.5. Surveillance de la population

La principale mesure de l'abondance des espèces sauvages *D. suzuki* dans les sites traités par SIT et dans les sites témoins, le nombre de femelles sauvages capturées par semaine sur des pièges collants rouges (planche collante à impact rouge, taille 10×24,5 cm—Russell IPM, Deeside, Royaume-Uni), puisque les femelles causent des dommages économiques [5]. Chaque piège collant rouge (ci-après appelé piège collant) a été complété par un leurre sémiochimique attaché (leurre sec SWD - Russell IPM) pour augmenter l'attraction de *D. suzuki* [34]. Les pièges collants et leurs leurres étaient placés à environ un mètre au-dessus du sol, suspendus sous les dessus de table (Figure 1B). De grands clips rabattables ont été utilisés pour donner plus de poids et maintenir les pièges stables pendant les jours venteux. Le site traité avait 33 pièges collants (Figure 1D), tandis que chaque site témoin en comptait 6 (Figure 1C, E). Les pièges collants étaient uniformément répartis et espacés d'environ 50 m dans les tunnels et d'environ 40 m entre les tunnels sur les trois sites. Les deux pièges dans les tunnels jaunes du site traité par SIT (Figure 1D) n'ont pas été inclus dans l'analyse car ces couvercles de polytunnel colorés avaient été installés dans le cadre d'un essai précédent testant si cela pouvait réduire *D. suzuki* invasion [35].

Les pièges collants rouges avec des leurres ont tendance à attraper moins *D. suzuki* par piège par semaine que les pièges à appât liquide [36], mais ont été préférés pour cette étude parce que l'appât liquide de noyade pourrait potentiellement laver la poudre fluorescente des mâles stériles recapturés. Ainsi, le nombre moyen hebdomadaire de *D. suzuki* capturées dans des pièges à seaux au cours des saisons précédentes (2018-2020) (Figure supplémentaire S1) ne sont pas directement comparables au nombre de mouches sauvages capturées sur des pièges collants rouges en 2021.

La possibilité que le *D. suzuki* capturés par les pièges de surveillance pourraient apporter une contribution significative aux résultats. L'expérimentation a donc utilisé une densité de piégeage similaire dans le site traité (4,6 pièges/ha) et dans chacun des sites témoins (4,3 pièges/ha). De plus, des études antérieures ont étudié le piégeage de masse comme une méthode possible pour contrôler *D. suzuki* et ont trouvé une efficacité très faible à nulle dans le contrôle des niveaux d'infestation dans les cultures de bleuets, à la fois lorsque les pièges étaient placés à 5 m l'un de l'autre dans la zone du périmètre [37] et 1,8 m l'un de l'autre dans la zone de culture [38]. Ainsi, notre conception de piège, où les pièges étaient espacés d'au moins 40 m les uns des autres, est très peu susceptible de piéger un nombre suffisamment élevé de *D. suzuki* avoir un impact significatif sur les populations locales.

Des pièges collants ont été collectés (emballés dans des pochettes perforées transparentes A4 à ouverture latérale et inférieure) et remplacés deux fois par semaine sur le site traité et une fois par semaine sur les sites témoins de la semaine 15 à la semaine 41. Cependant, les pièges ont été initialement collectés quotidiennement à le site traité pour faciliter la mesure de la longévité des *D. suzuki* (voir l'expérience de longévité ci-dessous). Les leurres sont restés sur place; un nouveau deuxième leurre a été ajouté à chaque piège collant après trois mois. Après la collecte, tous les pièges collants ont été apportés au laboratoire et le nombre de mâles marqués (irradiés), de mâles sauvages et de femelles sauvages a été noté dans une pièce sombre à l'aide d'un microscope optique et d'une torche UV (torche ultraviolette Elettrot 395 nm LED lumière noire) .

### 2.6. Expérience de longévité

Pour estimer la longévité du mâle stérile *D. suzuki* au champ, au début de l'essai de suppression, les mâles stériles lâchés dans le champ traité ont été marqués avec des poudres colorées fluorescentes intercalées et les pièges ont été remplacés quotidiennement. Aucun point de piégeage supplémentaire n'a été utilisé pour ces expériences, uniquement ceux déjà décrits ci-dessus ; de plus, les leurres n'étaient pas changés, de sorte que le nombre total de mouches piégées par semaine ne serait pas affecté. Quatre couleurs de poudre fluorescente ont été alternées (jaune, bleu, rouge et orange) pour marquer les mouches et identifier la date de libération de chaque cohorte. Le remplacement quotidien des pièges nous a permis de suivre la survie de chaque cohorte. Suivant le même protocole de libération décrit en 2.4, des groupes d'environ 5000 mouches ont été libérés à chaque fois. L'expérience a été répétée cinq fois en utilisant des couleurs différentes (une couleur a été répétée 14 jours après la première libération),

### 2.7. Stérilité induite sur le terrain de la femelle sauvage *D. suzukii*

Pour estimer la femelle sauvage induite sur le terrain *D. suzukii* stérilité causée par le lâcher des mâles stériles dans le champ traité, des femelles vivantes ont été capturées à partir de la semaine 30. Des pièges Suzukii (Suzukii Trap ; base rouge/dessus transparent—Russell IPM) ont été déployés sur les sites traités et témoins. Ceux-ci étaient destinés à attirer, mais pas à tuer *D. suzukii*. Au total, 19 pièges Suzukii ont été progressivement déployés et évalués deux fois par semaine, 15 ont été installés sur le site traité (six au périmètre et neuf sous les polytunnels), tandis que deux ont été installés sur chacun des sites témoins (un au périmètre et un sous les polytunnels). Jusqu'à la semaine 36, chaque piège Suzukii était appâté avec un leurre sec (comme décrit ci-dessus), ~20 myrtilles, ~20 g de framboises congelées (incluses dans un récipient en polypropylène à fond plat de 70 ml à couvercle jaune) et ~2 g Bakers levure (saupoudrée sur les myrtilles) (Figure supplémentaire S2). À partir de la semaine 37, l'appât a été remplacé par du coton imbibé d'environ 115 ml de gaz liquide (Gasser SWD Attractant-RIGA AG, Ellikon ad Thur, Suisse), qui s'est avéré plus efficace pour attirer et piéger les femelles sauvages *D. suzukii*. De plus, chaque piège Suzukii (quel que soit le type d'appât) contenait un flacon d'environ 10 mL de milieu sucre-gélose (2 % *p/v* gélose, 5 % *p/v* saccharose, 0,3 % *v/v* acide acétique) comme source de nourriture. Lors de chaque évaluation, les pièges Suzukii ont été récupérés et remplacés, puis renvoyés au laboratoire. Du coton et du ruban adhésif ont été utilisés pour sceller les trous de sortie et empêcher *D. suzukii* de s'échapper pendant le transport. Au laboratoire, tous les diptères ont été prélevés dans les pièges Suzukii à l'aide d'une pompe de laboratoire (Dymax 14 ; Charles Austen Pumps Ltd, Byfleet, Royaume-Uni) et/ou anesthésiés (placés au congélateur jusqu'à 3 min et 30 s). Ensuite, femelle *D. suzukii* ont été sélectionnés à l'aide de CO<sub>2</sub> et placés - individuellement jusqu'à la cinquième femelle et combinés en groupes de cinq par la suite - dans des flacons avec un milieu de semoule de maïs coloré avec un colorant alimentaire rouge (The Pantry Red Food Colouring, 6 ml par litre de régime). Les femelles ont été laissées pendant 48 h pour récupérer du CO<sub>2</sub>, puis transféré dans un nouveau flacon pour pondre des œufs pendant 24 h. Lorsque les femelles n'ont pas pondu pendant cette période, elles ont été laissées dans le flacon pendant 24 h supplémentaires. Ensuite, les femelles ont été retirées, le nombre d'œufs compté et la fécondité calculée. Dix jours plus tard, le nombre de pupes a été compté et la fertilité déterminée (comme ci-dessus). Pour tenir compte d'une baisse brutale du nombre d'œufs pondus par les femelles capturées, à partir de début octobre, la période de récupération avant la ponte a été augmentée jusqu'à un maximum de 15 jours. Nous avons émis l'hypothèse que cette baisse de fécondité était causée par des conditions météorologiques plus fraîches enregistrées (données non présentées).

### 2.8. L'analyse des données

#### 2.8.1. Test de validation de la stérilité

La fécondité et la fertilité moyennes pour le test de validation de la stérilité ont été calculées pour chaque groupe de femelles qui se sont accouplées avec des mâles non irradiés ou irradiés. Les données ont été analysées avec le logiciel R (version 4.1.1) [39]. Les femelles qui n'ont pas pondu d'œufs ont été retirées de l'analyse de la fertilité. Les données ont été testées pour la normalité à l'aide des tests de Shapiro-Wilk. Des tests ANOVA à un facteur ont été utilisés pour les données de fécondité, tandis que les tests de Kruskal-Wallis ont été utilisés pour les données de fécondité.

#### 2.8.2. Stérilité du mâle libéré *D. suzukii*

La fécondité et la fertilité moyennes des femelles capturées dans le champ ont également été calculées et analysées avec le logiciel R (version 4.1.1) [39]. Les femelles qui n'ont pas pondu d'œufs ont été retirées de l'analyse de la fertilité. Les données ont été testées pour la normalité à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les tests de Kruskal-Wallis ont été utilisés pour les ensembles de données de fécondité et de fertilité. Pour faciliter la gestion des données, nous avons d'abord comparé la fécondité et la fertilité aux deux sites témoins ; après avoir trouvé aucune différence significative, nous avons ensuite combiné les données du site de contrôle pour une analyse plus approfondie.

#### 2.8.3. Calculs de longévité et de cultures sur pied

Pour chaque cohorte relâchée, on a supposé que la diminution du nombre de recaptures quotidiennes au fil du temps était due à la mortalité. Par conséquent, le taux de déclin a été utilisé pour estimer la longévité à l'aide des statistiques MRR adaptées de Niebylski et Craig [40]. Enlèvement des insectes marqués de

la population due à la recapture pourrait confondre l'analyse car elle serait interprétée à tort comme une mortalité. Dans de nombreuses études, la proportion de mouches relâchées recapturées était suffisamment faible pour qu'un ajustement pour les insectes recapturés n'ait pas été mis en œuvre. Cependant, en raison de la forte proportion de recaptures dans ces expériences (~10%), le nombre de *D. sukii* de chaque couleur recapturée lors du piégeage quotidien a été ajustée pour tenir compte du nombre de *D. sukii* récupéré les jours précédents. Cela a été réalisé en multipliant chaque valeur par le numéro de version d'origine et en divisant par le nombre de non capturés *D. sukii*. Cela a effectivement estimé et rajouté le nombre de captures précédemment capturées *D. sukii* qui auraient été capturés s'ils n'avaient pas été retirés de l'expérience. Ensuite, les moyennes mobiles sur trois jours des recaptures ajustées ont été calculées et transformées en  $\text{Log}_{dx}$ . La pente de la droite de régression de  $\text{Log}_{dx}$  (recaptures ajustées) par rapport au jour du piégeage a été utilisé pour calculer la probabilité de survie quotidienne (PDS), en utilisant

$$\text{PDS} = 10^{\text{pente}}$$

La demi-vie (HL) et l'espérance de vie moyenne (ALE) ont été dérivées du PDS, où

$$\text{HL} = \text{Journal}_e(0,5)/\text{journal}_e(\text{PDS})$$

et

$$\text{ALE} = -1/\text{Journal}_e(\text{PDS}).$$

Les lignes de régression ont été ajustées à l'aide de GraphPad Prism (Graph-Pad Software, San Diego, CA, USA) ; cela a identifié que trois des cinq répétitions avaient un ajustement significatif. Les statistiques récapitulatives, les meilleures valeurs d'ajustement, les intervalles de confiance à 95%, la qualité de l'ajustement et les tests de normalité pour ces trois répliques ont été calculés (tableau supplémentaire S4). Le PDS final, HL et ALE, et les écarts-types correspondants, ont été dérivés de la moyenne des trois exemplaires.

Le nombre quotidien estimé de mâles stériles prédits vivants à un moment donné (estimation de la culture sur pied) (SS) a été calculé à partir du nombre de mâles stériles relâchés (R) et du PDS estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{SS}_{dx} = (\text{SS}_{dx-1} \times \text{PDS}) + \text{R}_{dx},$$

où le nombre de mâles stériles vivants chaque jour ( $\text{S}_{dx}$ ) est égal au nombre de mâles stériles vivants la veille ( $\text{S}_{dx-1}$ ) multiplié par le PDS plus le nombre de mâles stériles relâchés un jour donné ( $\text{R}_{dx}$ ). La récolte sur pied de mâles sauvages (SW) a été calculée sur la base de la récolte sur pied moyenne hebdomadaire de mâles stériles (SS) et le ratio de mâles stériles (S) et sauvages (W) piégés au cours de cette semaine. L'équation suivante a été utilisée pour calculer la récolte sur pied hebdomadaire de mâles sauvages :

$$\text{SW} = \text{O/S} \times \text{SS}$$

#### 2.8.4. Suppression de la nature *D. sukii* Population

L'intervalle de piégeage variait entre les sites (bihebdomadaire pour le site traité et hebdomadaire pour les sites témoins) et dans le temps (quotidien pour l'étude MRR de longévité). Par conséquent, l'unité de mesure normalisée analysée était le nombre total de femelles par piège collant par semaine. L'effet du traitement SIT sur le nombre de femelles capturées au fil du temps a été analysé avec un modèle mixte Poisson GLM utilisant le package lme4 1.1–27.1 [41] dans R (version 4.1.1) [39]. Le nombre de mouches capturées sur des pièges collants par semaine a été traité comme des mesures répétées et, comme nous n'avions qu'un seul champ traité, les polytunnels ont été considérés comme des unités de réplification, établies comme des facteurs croisés. Les effets aléatoires étaient la semaine polytunnel-piège (pseudo répétitions) ; polytunnel—pièges (mesures répétées). Les effets du traitement ont été mesurés à l'aide d'un test du rapport de vraisemblance suivi d'un test post hoc à l'aide du package emmeans 1.7.0 [42].

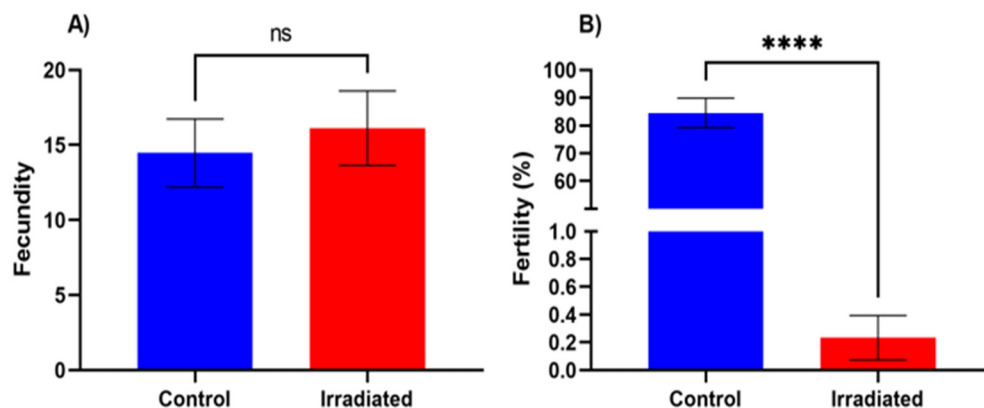


### 3. Résultats

#### 3.1. Test de validation de la stérilité

La fécondité (nombre d'œufs pondus par femelle par période de 24 h) des femelles qui se sont accouplées avec des mâles non irradiés était de 14,48 ( $\pm 2.27$  SE) œufs. Ce n'était pas significativement différent par rapport à la fécondité des femelles qui se sont accouplées avec des mâles irradiés (ANOVA à un facteur :  $F(1,38) = 0,24, p = 0,63$ ), qui a pondu 16,13 ( $\pm 2.48$ ) œufs (Figure 2A).

Il y a eu une réduction significative,  $>99,7\%$ , de la fertilité (% œuf-pupe) des femelles qui se sont accouplées avec des mâles irradiés (0,23 %,  $\pm 0,16$ ) par rapport aux femelles qui se sont accouplées avec des non irradiés (témoins) 84,60 % ( $\pm 5,27$ ) (Kruskal–Wallis :  $H = 24,84$ ,  $df = 1, p < 0,001$ ) (chiffre 2B).



**Figure 2.**(A) Fécondité des femelles ( $\pm$ SE) qui se sont accouplées avec des mâles témoins (non irradiés) et irradiés. La fécondité est présentée comme le nombre moyen d'œufs pondus par femelle sur une période de 24 h. (B) La fertilité (%) ( $\pm$ SE) de femelles qui se sont accouplées avec des mâles témoins (non irradiés) et irradiés. La fertilité est présentée comme le pourcentage d'œufs qui ont éclos et se sont développés jusqu'au stade de pupe. ns—pas de différence significative entre les traitements ; les astérisques représentent une différence significative entre les traitements (\*\*\*\* =  $p < 0,001$  ; test de Kruskal–Wallis).

#### 3.2. Libérations masculines stériles

Un total de 950 739 mâles stériles *D. sukui* ont été relâchés sur le site traité tout au long de l'essai (avril–octobre), dont 619 604 ont été relâchés sous les polytunnels et 331 135 autour du périmètre des polytunnels. Au total, 14 910 mâles stériles *D. sukui* ont été recapturés sur les pièges placés sous les polytunnels. Cela représente 2,41% des mouches relâchées sous les polytunnels. Cependant, le taux de recapture a baissé progressivement au cours de la campagne passant de plus de 10% en avril à moins de 1% en octobre.

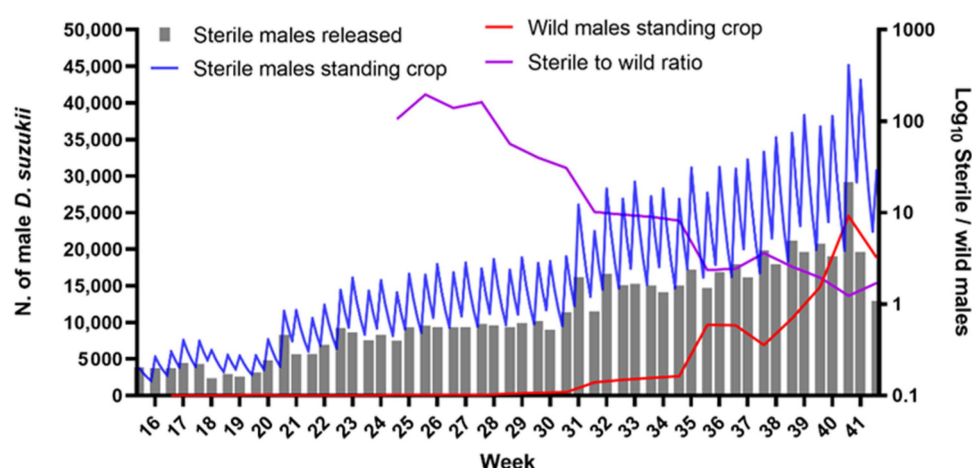
#### 3.3. Longévité et récolte sur pied estimée

Dans les trois versions utilisées pour estimer la longévité dans les conditions de terrain, un total de 1 503 *D. sukui* ont été recapturés, représentant 10,13 % du nombre total relâché. Basé sur la moyenne des trois rejets, le PDS ( $\pm$ SD), HL ( $\pm$ SD) et ALE ( $\pm$ SD) du stérile *D. sukui* étaient de 0,80 ( $\pm 0,01$ ), 3,19 ( $\pm 0,18$ ) jours et 4,60 ( $\pm 0,25$ ) jours, respectivement (tableau 1). La figure S3 présente les droites de régression du Log des taux ajustés de recapture des stériles *D. sukui* sur la période de piégeage de 14 jours pour les 3 lâchers (réplique 1–3).

**Tableau 1.** Pentas des lignes de régression, probabilité de survie quotidienne (PDS), demi-vie (HL) et espérance de vie moyenne (ALE) du mâle stérile *D. sukui*.

Reproduire	Pente	SDP	HL (jours)	ALE (jours)
1	−0,09	0,81	3.37	4,87
2	−0,10	0,80	3.15	4,55
3	−0,10	0,80	3.03	4.37
Moyenne ( $\pm$ DAKOTA DU SUD)	−0,09 ( $\pm 0,01$ )	0,80 ( $\pm 0,01$ )	3.19 ( $\pm 0,18$ )	4,60 ( $\pm 0,25$ )

La récolte sur pied de mâles stériles au site traité variait en raison de la mortalité des glossines et des lâchers bihebdomadaires (Figure 3). Réflétant la capacité de production, elle a augmenté régulièrement tout au long de la saison, passant d'environ 9 000 mâles stériles par semaine au cours de la semaine 16 à environ 60 000 au cours de la semaine 41. Environ les deux tiers de ces mâles ont été relâchés dans la culture (Figure 3), les autres ont été relâchés dans l'habitat périphérique. Le nombre estimé de mâles sauvages (récolte sur pied de mâles sauvages), qui a été calculé sur la base du rapport entre les mâles stériles et les mâles sauvages capturés sur les pièges collants placés sous les polytunnels et la récolte sur pied estimée de mâles stériles (comme décrit ci-dessus), était par centaines jusqu'à la semaine 30. En semaine 31, le nombre de mâles sauvages a été estimé à 1783 sous les polytunnels. Ce chiffre est passé à 18 817 à la fin de l'essai (semaine 41).



**Figure 3.** Nombre de mâles stériles *D. suzukii* relâché (gris), récolte sur pied estimée de mâles stériles (ligne bleue) et sauvages (ligne rouge) *D. suzukii* (la gauche y-axe) et le rapport entre les captures stériles et sauvages (ligne violette, droite Oul-axe) sur des pièges collants rouges (planche collante à impact rouge ; 10×24,5 cm—Russell IPM), chacun avec un leurre sec attaché (leurre sec SWD—Russell IPM) sur le site traité par SIT sous polytunnels tout au long de l'essai (avril-octobre 2021). Le ratio mâles stériles/sauvages avant la semaine 25 a été exclu car aucun mâle sauvage n'a été capturé. L'axe de droite représente le rapport stérile/sauvage sur une échelle logarithmique.

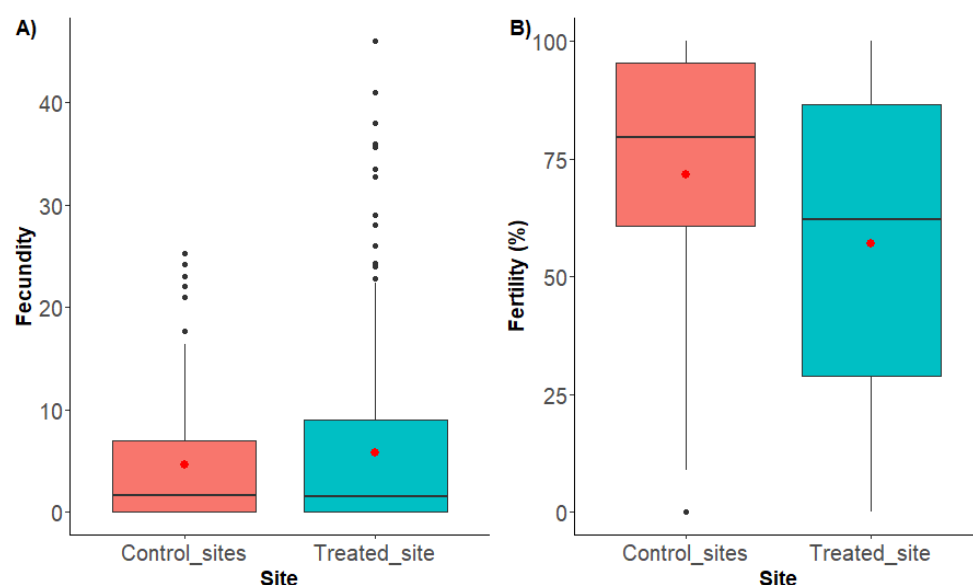
### 3.4. Stérilité sur le terrain de la femelle sauvage *D. suzukii*

La fécondité féminine *D. suzukii* ne différait pas significativement entre les sites témoins et traités (Kruskal–Wallis :  $H = 0,21$  ;  $df = 1$ ,  $p = 0,65$ ). La fécondité moyenne des femelles aux sites témoins était de  $4,62 (\pm 0,73 \text{ SE})$  œufs par femelle par 24 h, semblable à la moyenne des femelles prélevées sur le site traité  $5,79 (\pm 0,57 \text{ ET})$  (Figure 4A). En revanche, la fertilité des femelles collectées sur les sites témoins était de  $71,60\% (\pm 4,12 \text{ \% SE})$ , ce qui était significativement plus élevé par rapport au site traité  $57,00\% (\pm 2,71 \text{ \% SE})$  (Kruskal–Wallis :  $H = 6,64$  ;  $df = 1$  ;  $p = 0,01$ ) (Figure 4B). Le nombre de femelles sauvages capturées par semaine dans les sites traités et témoins ainsi que le nombre d'œufs pondus par ces femelles, le nombre de pupes générées à partir de ces œufs et la fécondité et la fertilité globales des femelles sont présentés dans le tableau supplémentaire S5.

### 3.5. Suppression de la population sauvage de *D. suzukii*

La principale métrique utilisée pour mesurer la femelle sauvage *D. suzukii* la prévalence et donc l'estimation de la suppression était le nombre moyen de femelles sauvages *D. suzukii* par piège collant à chaque site au fil du temps. Pendant toute la durée de l'essai, un total de 520 femelles sauvages ont été enregistrées sur le site traité, soit une moyenne de 16,8 femelles par piège. Aux sites témoins 1 et 2, le nombre moyen de femelles sauvages par piège était de 55,0 et 80,1, respectivement. Il y a eu un effet significatif du traitement (libération de mâles stériles *D. suzukii*), et le temps (femelles capturées tout au long de la saison), y compris un effet significatif sur l'interaction entre les deux variables de réponse

(Table 2). Cela indiquait que les captures de femelles étaient incohérentes tout au long de la saison, mais différaient également d'un site à l'autre.



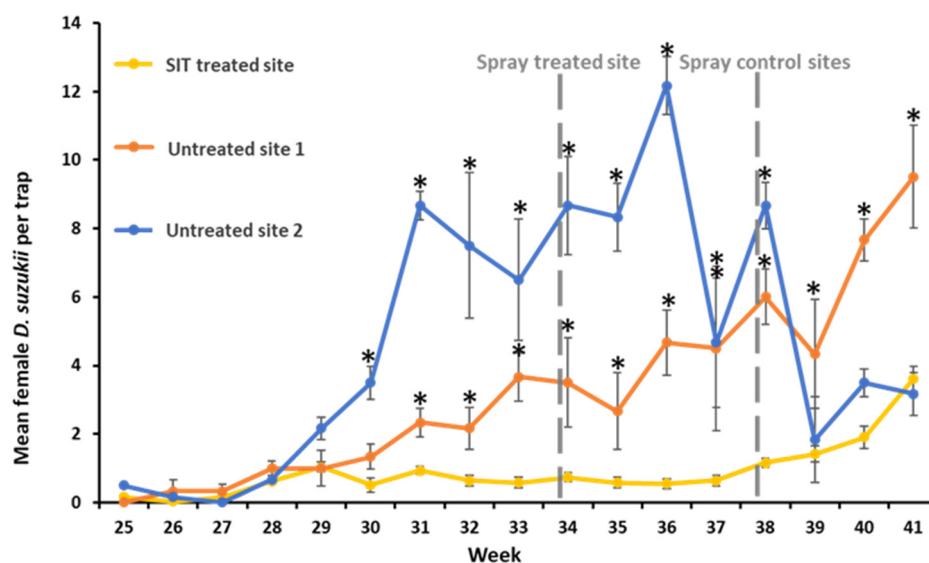
**Figure 4.**(UN) Fécondité et (B) fertilité de la femelle sauvage *D. suzuki* prélevés sur les sites traités par SIT et témoins (combinés) de la semaine 30 à la semaine 41. La fécondité est calculée comme le nombre d'œufs pondus par femelle par 24 h. La fertilité est calculée comme le pourcentage d'œufs qui se sont développés en pupes. Les boîtes à moustaches représentent l'intervalle interquartile de la médiane (ligne horizontale). Les barres d'erreur représentent la variation des données en dehors de la plage interquartile. Les points rouges représentent la moyenne et les points noirs représentent les valeurs aberrantes.  $n = 1804$  femelles au total : 420 dans les sites témoins non traités ; 1384 sur le site traité par SIT.

**Tableau 2.** Résumé des statistiques de test pour les tests de rapport de vraisemblance analysant l'interaction entre *D. suzuki* infestation, traitement ITS et période de l'année (semaine).

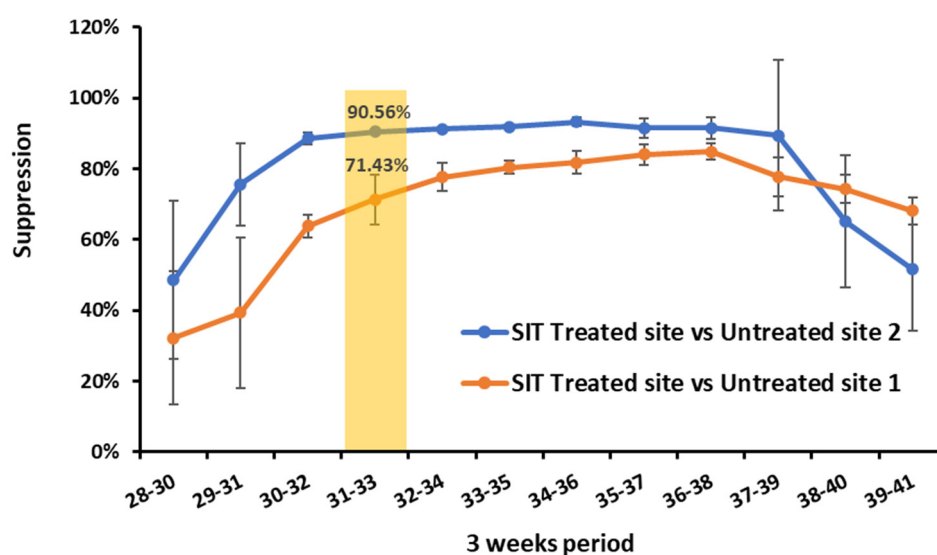
Variable de réponse	Npar	Déviance	Chisq	Degrés de Liberté	Pr (> Chisq)
<b>Nul</b>	4	2388.1			
La semaine	21	2215.1	173.06	17	<0,001
<b>Traitement ITS</b>	23	2161.8	53.28	2	<0,001
<b>La semaine × Traitement ITS</b>	53	2014.6	147.19	30	<0,001

Le site traité avait un nombre durablement plus faible de femelles sauvages *D. suzuki* sur la saison par rapport aux sites témoins (Figure 5). Jusqu'à la semaine 27, le nombre de femelles par piège était similaire et proche de zéro aux trois sites. Après les semaines 29 à 30, le nombre moyen de femelles par piège a commencé à augmenter de façon exponentielle sur les deux sites témoins, mais est resté relativement stable jusqu'à la semaine 37 sur le site traité. L'augmentation des femelles sauvages *D. suzuki* dans les sites témoins a suivi l'apparition des premiers fruits. La maturation des fruits a commencé à la mi-juin (semaines 24 à 26) et la culture s'est arrêtée fin octobre (semaine 42). Dans le cadre du programme IPM de la ferme, une pulvérisation d'insecticide a eu lieu sur les trois sites ; cependant, cela s'est produit à différents moments au cours du procès. Le site traité a été pulvérisé avec du cyantraniliprole (100 g L<sup>-1</sup>) à raison de 750 mL ha<sup>-1</sup> pendant la semaine 34, tandis que les deux sites témoins ont reçu le même traitement quatre semaines plus tard (semaine 38) (Figure 5; Tableau supplémentaire S2).

En raison de la volatilité des données de comptage hebdomadaire, la suppression a été calculée sur la base d'une moyenne mobile sur trois semaines (Figure 6). La suppression la plus importante avant la semaine 34 s'est produite au cours des semaines 31 à 33, lorsqu'il y a eu une suppression de la population de ravageurs de 71,43 % et 90,56 % sur le site traité par rapport aux sites témoins 1 et 2, respectivement.



**Figure 5.** Nombre moyen de femelles *D. suzukii* ( $\pm$ SE) capturés par piège et par semaine sur les sites témoins traités par SIT et non traités tout au long de l'essai. Différences statistiquement significatives ( $p \leq 0,05$ ; modèle mixte GLM) entre le site traité par SIT (ligne jaune,  $n = 31$ ) et chacun des sites témoins non traités 1 (ligne bleue,  $n = 6$ ) et 2 (ligne orange,  $n = 6$ ) sont représentés par un astérisque au-dessus des barres d'erreur pour chaque semaine. Application foliaire d'insecticide (cyantraniliprole (100 g L<sup>-1</sup>) à raison de 750 mL ha<sup>-1</sup>) sur les sites témoins traités par SIT et non traités sont mis en évidence par des lignes pointillées grises verticales.



**Figure 6.** Suppression (%) de la femelle sauvage *D. suzukii* population du site traité par ITS par rapport aux deux sites témoins non traités. La suppression est dérivée des moyennes mobiles sur trois semaines des femelles *D. suzukii* par piège collant rouge, en comparant le site traité par SIT et les sites témoins non traités (suppression = 1 - (site traité/site témoin)). La case jaune pleine met en évidence le taux de suppression le plus élevé obtenu sur le site traité par SIT par rapport aux sites témoins avant la pulvérisation d'insecticide sur le site traité par SIT. Les barres d'erreur représentent le SE de la valeur sur trois semaines.

#### 4. Discussion

Pendant plus de 60 ans d'utilisation opérationnelle, la SIT s'est avérée être une méthode très efficace et sans danger pour l'environnement de lutte contre les insectes nuisibles. Il a été utilisé contre d'importants ravageurs dans l'agriculture, la santé publique, le bien-être animal et d'autres secteurs. Pour un examen approfondi de SIT, voir [dix].

Dans la présente étude, nous avons démontré, pour la première fois, la faisabilité de l'utilisation de la SIT pour contrôler *D. suzukii*, un ravageur économique mondial majeur des fruits rouges et à noyaux, dans un cadre commercial sans barrières physiques efficaces, c'est-à-dire des polytunnels ouverts utilisant des sacs de substrat de coco-coir sur des tables. Nous avons fourni des preuves suggérant qu'une intervention SIT précoce, à partir du printemps *D. suzukii* émerger de l'hivernage, comprenant des lâchers réguliers de mâles stériles, peut supprimer la croissance exponentielle signalée de *D. suzukii* [43] sur des fraisiers remontants cultivés dans ce milieu. En commençant les lâchers de mâles stériles tôt dans la saison, lorsque les populations sauvages étaient encore faibles, et en maintenant une population stérile importante tout au long de la saison, nous avons pu maintenir un faible niveau d'infestation sur le site traité (Figure 5).

Nous avons pu attribuer la suppression due uniquement à la SIT uniquement jusqu'à et y compris la semaine 33 en raison de l'application d'insecticide chimique sur le site traité (Figure 6). Malgré cela, en comparaison avec les deux sites témoins non traités, des taux de suppression allant jusqu'à 71 % et 91 % ont été atteints par le traitement SIT seul, mesuré sur une moyenne mobile de trois semaines. Cependant, étant donné que le nombre moyen de femelles sauvages par piège différait considérablement entre les sites témoins au cours de l'essai, il est possible que la suppression attribuée au traitement SIT ait été sous-estimée ou surestimée en raison de variations naturelles. Il est également possible que les facteurs environnementaux aient été moins favorables à la croissance démographique de *D. suzukii* dans la région testée en 2021 par rapport aux années précédentes. Cela aurait pu contribuer au succès de cet essai en réduisant le dénominateur du ratio stérile/sauvage. De même, les champs de fraises ne connaissent généralement pas des niveaux aussi élevés de *D. suzukii* infestations comme certaines autres cultures, comme les mûres. Par conséquent, les essais dans les saisons avec plus de *D. suzukii* pression et dans d'autres cultures fournira des informations supplémentaires sur l'efficacité de la SIT pour maintenir le contrôle de *D. suzukii* dans ces circonstances.

Nous avons également montré que lorsque les sites témoins étaient aspergés d'insecticide chimique, une suppression substantielle ou durable de *D. suzukii* infestation par rapport au site traité n'a pas été atteinte. Fait intéressant, l'application d'insecticide n'a pas considérablement réduit le nombre de femelles *D. suzukii* dans le site témoin non traité 2 et il n'y avait aucun effet détectable sur le site traité par SIT. Enfin, nous avons démontré que la SIT a le potentiel d'être appliquée avec succès dans des fermes commerciales individuelles pour contrôler la faune sauvage locale *D. suzukii* population. Étant donné que *D. suzukii* est l'un des ravageurs des fruits rouges et des fruits à noyau les plus importants sur le plan économique au monde, une méthode de lutte qui ne repose pas sur des insecticides à large spectre est nécessaire de toute urgence. La SIT, un outil de lutte antiparasitaire respectueux de l'environnement, est particulièrement bien adaptée aux cultures à récolte continue, car elle ne nécessite pas d'intervalles avant la récolte. De plus, lorsque la SIT est utilisée de manière préventive, elle ne repose pas sur un seuil d'infestation, qui est généralement déjà associé à un certain degré de dommages aux cultures et de pertes économiques pour les producteurs.

Tandis que *D. suzukii* suppression a été démontrée en une seule saison, la suppression hebdomadaire soutenue de *D. suzukii* les captures au casier témoignent de *D. suzukii* contrôle dans la culture. Il s'agit d'une approche comparable à d'autres études évaluant la faisabilité de l'utilisation de la SIT contre d'autres espèces avec plusieurs générations par saison [44,45].

Le taux de recapture des mâles stériles relâchés *D. suzukii*, qui étaient tous marqués, dans la zone traitée était généralement d'environ 1 % à la fin de l'été, lorsque *D. suzukii* infestation était la plus élevée, validant davantage l'hypothèse lorsque la disposition des pièges a été conçue que nos pièges de surveillance n'ont pas contribué à *D. suzukii* suppression dans nos sites d'étude. La densité de pièges utilisée pour surveiller le site traité par SIT était de 4,6 pièges/ha. Une étude récente examinant le potentiel du piégeage de masse pour supprimer *D. suzukii* populations de cerises acides ont montré que, selon l'attractif et l'environnement, la densité de pièges nécessaire pour produire une grille de pièges à rayons d'attraction contigus variait de 25 à 300 pièges/ha [46].

La stérilité sexuelle peut être induite par différents moyens ; il s'agit notamment d'agents chimiques, de manipulations génétiques et de rayonnements ionisants (rayons X et rayons gamma). Le principal avantage des rayonnements ionisants, en particulier des rayons X, est qu'ils ne créent ni n'utilisent de contaminants environnementaux potentiels tels que des déchets radioactifs, des chimiostérilisants ou du matériel transgénique. *Drosophila suzukii* est relativement résistant aux dommages somatiques radio-induits et aux pénalités de fitness qui y sont associées [47]. Dans une première tentative d'identification d'un SIT optimal



dose de rayonnement pour *D. sukuii*, Lanouette et al. [22] ont exposé des pupes de quatre jours à des doses croissantes de rayonnement gamma (0, 30, 50, 70, 80, 90, 100, 120 Gy) et ont mesuré l'effet de ces doses sur l'émergence des adultes, la longévité, la fécondité et la fertilité des survivants. Les auteurs ont montré qu'aucune des doses de rayonnement n'avait d'effet significatif sur les paramètres testés, hormis la fertilité et la fécondité. Même avec la dose la plus élevée (120 Gy), qui a réduit la fertilité de plus de 99 %, aucun impact apparent sur *D. sukuii* Fitness a été observée. Une étude de suivi menée par les mêmes auteurs a conclu que la dose d'irradiation de 120 Gy appliquée à des pupes âgées de quatre jours n'affectait pas les performances d'accouplement des mâles dans des conditions non compétitives et compétitives en laboratoire [24]. Des études antérieures utilisant des rayons gamma ont rapporté que des doses de stérilisation allant jusqu'à 200 Gy sur les pupes n'avaient aucun effet sur l'émergence des adultes, la capacité de vol, le sex-ratio, la longévité ou le comportement reproducteur des *D. sukuii* [30,33]. Des résultats similaires ont été rapportés par Sassu et coll. [48] étudiant les effets de l'irradiation *D. sukuii* pupes dans des conditions d'oxygène faibles et normales. Les auteurs ont rapporté que des doses de rayonnement allant jusqu'à 220 Gy sous les deux traitements atmosphériques n'avaient aucun effet sur le taux d'émergence et la capacité de vol des *D. sukuii*. Au total, ces études suggèrent que *D. sukuii* peut résister aux doses de rayonnement nécessaires pour induire des niveaux de stérilité élevés sans compromettre la condition physique.

Notre étude est la première à étudier l'utilisation des rayons X pour stériliser *D. sukuii* pour SIT. Nos résultats ont corroboré ceux de la littérature utilisant les rayons gamma et ont démontré que *D. sukuii* ont pu survivre dans des conditions de terrain. Le PDS calculé de 0,8 indiquait un taux de survie quotidien qui se traduit par une espérance de vie moyenne (ALE) de 4,6 jours dans des conditions de terrain. Mâles stériles élevés en masse de *Anastrepha ludens* (Low) et *A. oblique* (Macquart) relâchés sur un verger de manguiers ont présenté une ALE de 2,2 et 4,2 jours, respectivement, et ceux-ci n'étaient pas statistiquement significatifs chez les mâles sauvages de la même espèce, qui ont présenté une ALE de 3,1 et 4,3 jours, respectivement [49]. Nous n'avons pas été en mesure d'estimer l'espérance de vie des espèces sauvages *D. sukuii* pendant cet essai, nous ne pouvons donc pas déduire si les mâles stériles ont vécu pendant une période plus courte que les mâles sauvages dans des conditions de terrain. De plus, la mesure a été prise en début de saison alors qu'il faisait relativement froid et que le feuillage des cultures était moins développé, il est donc possible que les mouches relâchées plus tard dans la saison aient présenté une durée de vie différente.

L'écart entre les niveaux de fertilité des femelles accouplées avec des mâles irradiés en laboratoire et celui des femelles capturées dans le champ traité par SIT pourrait être attribué à deux facteurs. Premièrement, la fertilité des femelles capturées dans le champ traité par SIT est présentée comme la fertilité globale de toutes les femelles capturées au cours de cette expérience (semaine 30 à 41). Il est probable que, si certaines de ces femelles se sont accouplées avec des mâles irradiés, d'autres se sont accouplées avec des homologues sauvages fertiles, y compris dans les zones adjacentes, avant d'envahir le site traité. Deuxièmement, certaines des femelles pourraient s'être accouplées avec des mâles sauvages et irradiés.

*D. sukuii* est connu pour se recoupler [23,24,50]. L'ordre dans lequel les femelles s'accouplent avec les mâles stériles ou fertiles semble influencer le résultat, les premiers mâles ayant une plus grande influence sur la fertilité des œufs [50]. Les deux facteurs pourraient alors être influencés par le rapport stérile/sauvage atteint dans le site traité par SIT.

La décision de ne libérer que des mâles stériles supposait que les femelles stériles interféreraient avec le succès des mâles stériles à s'accoupler avec des femelles sauvages. Dans une étude comparant les versions non mixtes (hommes uniquement) et bi-sexes (hommes et femmes) de stériles *C. capitata* dans les plantations de café au Guatemala pendant trois ans, il a été conclu que les lâchers réservés aux mâles augmentaient de trois fois les niveaux de stérilité induite des œufs pondus par les femelles sauvages [51]. En ne relâchant pas les femelles stériles, nous avons également éliminé le risque de dommages à la culture, même si ces femelles sont entièrement stériles et ne pondent généralement pas d'œufs [22].

L'une des principales idées fausses sur la SIT est qu'elle doit être appliquée à une grande surface pour être efficace. Bien que cela puisse être vrai si l'éradication est l'objectif final, il est bien établi que la TIS peut réduire les populations de ravageurs en dessous des seuils économiques à des échelles beaucoup plus petites. Ceci est très pertinent pour les modèles commerciaux qui reposent sur la vente de produits anti-insectes aux producteurs pour des fermes individuelles. La plus petite taille de champ pratique pouvant être traitée est inversement proportionnelle à la dispersion de l'organisme nuisible. La dispersion quotidienne de *D. sukuii* a été estimée à 28,8 m dans les bleuets en corymbe, avec une distance de dispersion maximale pour 95 % de la

population estimée à ~90 m [52]. Dans les vergers de cerisiers et d'agrumes, les dispersions quotidiennes ont été estimées à 90 m et 200–300 m, respectivement [53,54]. Dans une étude portant sur la dispersion à longue distance à l'échelle régionale, *D. suzukii* s'est avéré capable de se disperser jusqu'à 9000 m, migrant vers des altitudes plus élevées au printemps et en été et des altitudes plus basses en automne et en hiver [55]. On pensait que cette dispersion sur de longues distances était facilitée par les brises saisonnières induites par les différences de température entre les altitudes de la zone. Dans cette étude, nous avons vu un très faible nombre de mâles stériles recapturés dans le site témoin 1 non traité (8 sur un total de 925 042 mâles stériles relâchés), qui était à 300 m du site traité par SIT. Ceci, ainsi que l'espérance de vie estimée, suggèrent que les mouches ne se dispersent pas sur de longues distances dans les milieux étudiés.

Les résultats présentés ici indiquent que la SIT peut être utilisée avec succès pour contrôler *D. suzukii* dans des fermes commerciales individuelles où la récolte est cultivée sous des polytunnels à ciel ouvert. Notre approche de libération réactive aux infestations a distribué un nombre de base d'insectes stériles dans tout le champ et a ajouté un nombre supplémentaire *D. suzukii* où un nombre accru d'insectes sauvages ont été détectés. Ces sorties ciblées ont été répétées deux fois par semaine tout au long de la saison. De plus, nous avons généralement relâché un tiers de nos mâles stériles dans les zones du périmètre du champ, ajoutant ainsi une zone tampon qui agissait comme première ligne de défense contre l'invasion. *Drosophila suzukii* utiliser les marges des champs contenant des plantes non cultivées comme refuges et ceux-ci pourraient devenir des sites de reproduction s'ils contiennent un hôte alternatif, comme les mûres sauvages [56]. La possibilité de cibler ces zones est clairement un avantage majeur de la SIT par rapport aux insecticides chimiques qui ne sont pas homologués pour traiter les zones non cultivées.

**Matériel supplémentaire :** Les informations complémentaires suivantes peuvent être téléchargées sur : <https://www.mdpi.com/article/10.3390/insects13040328/s1>, Figure S1 : Nombre moyen de *D. suzukii* capturés par semaine dans des pièges à appâts liquides au cours des trois saisons précédant l'étude (2018–2020), domaine. Figure S3 : Lignes de régression du log<sub>dix</sub>[recaptures ajustées] de mâles stériles relâchés

*D. suzukii* menée dans le cadre de l'expérience de longévité sur le site traité par SIT, Tableau S1 : Fertilité des mouches échantillonnées à partir des flacons de libération, Tableau S2 : Dossiers d'application d'insecticide dans les sites traités par SIT et témoins au cours de la saison 2021, Tableau S3 : Nombre et pourcentage des mâles stériles lâchés sous polytunnels et au périmètre, Tableau S4 : Statistiques récapitulatives, valeurs de meilleur ajustement, intervalles de confiance à 95 %, qualité de l'ajustement et tests de normalité des trois lâchers de mâles stériles *D. suzukii* menée dans le cadre de l'expérience de longévité sur le site traité par SIT, Tableau S5 : Fertilité des femelles sauvages *D. suzukii* prélevés sur les sites témoins et traités par SIT de la semaine 30 à la semaine 41.

**Les contributions de l'auteur :** Conceptualisation, GS, MTF et RAH ; méthodologie, ARM, GS, MTF, RAH et ZM-F. ; analyse formelle, ARM, GS, RAH et ZM-F. ; enquête, DG, RAH, RJ et ZM-F. ; ressources, GS et MTF ; conservation des données, ZM-F. ; rédaction—préparation du brouillon original, RAH ; rédaction—révision et édition, ARM, DG, GS, MTF, RAH, RJ et ZM-F. ; visualisation, ARM, RAH et ZM-F. ; surveillance, RAH ; administration de projet, GS ; acquisition de financement, GS et MTF Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

**Le financement :** Aucun financement externe reçu pour cette étude.

**Déclaration du comité d'examen institutionnel :** N'est pas applicable.

**Déclaration de consentement éclairé :** N'est pas applicable.

**Déclaration de disponibilité des données :** Les ensembles de données seront disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

**Remerciements :** Nous tenons à remercier Berry Garden Growers, qui a financé la participation de Rory Jones à ce projet, en particulier Richard Harnden et Marco Corradi. Nous tenons également à remercier Andrew Barclay de Clock House Farm pour avoir fourni les sites d'essai et de contrôle, et Adam Walker, Sebastian Hemer et Greg Deakin de NIAB EMR pour leurs conseils sur *D. suzukii* et statistiques.

**Les conflits d'intérêts :** DG, GS, RAH et ZM-F. sont des employés de BigSis, fournisseur de solutions durables de lutte contre les insectes. ARM est un consultant rémunéré pour BigSis. Des honoraires de conseil ont été payés par BigSis à NIAB EMR pour le temps de MTF sur ce projet, fournissant des conseils sur la mise en place, la configuration et les évaluations des essais. Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt supplémentaire.

## Références

1. Bolda, député ; Goodhue, RE; Zalom, FG Spotted Wing *Drosophila* : impact économique potentiel d'un ravageur nouvellement établi. *Agric. Resour. Econ. Mettre à jour Univ. Californie Giannini trouvé*. **2010**, *13*, 5–8.
2. Calabre, G. ; Munca, J. ; Bachli, G.; Serra, L.; Pascual, M. Premières mentions des espèces nuisibles potentielles *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) en Europe. *J. Appl. Entomol.* **2012**, *136*, 139–147. [RéfCroisée]
3. Harris, A. ; Shaw, B. Premier enregistrement de *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera, Drosophilidae) en Grande-Bretagne. *Les diptères creusent*. **2014**, *21*, 189–192.
4. Atallah, J. ; Teixeira, L.; Salazar, R.; Saragossa, G.; Kopp, A. La fabrication d'un ravageur : l'évolution d'un ovipositeur pénétrant dans les fruits *Drosophila suzukii* et espèces apparentées. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **2014**, *281*, 20132840. [RéfCroisée]
5. Walsh, DB ; Bolda, député ; Goodhue, RE; Dreves, AJ ; Lee, J.; Bruck, DJ ; Walton, VM; O'Neal, SD ; Zalom, FG *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) : Ravageur envahissant des fruits mûrissant élargissant son aire de répartition géographique et son potentiel de dommages. *J. Intégr. Gestion des nuisibles* **2011**, *2*, 3–9. [RéfCroisée]
6. Ioriatti, C. ; Guzzon, R.; Anfora, G.; Ghidoni, F.; Mazzoni, V.; Villegas, TR; Dalton, DT ; Walton, VM *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) Contribue au Développement de la Pourriture Acide du Raisin. *J. Econ. Entomol.* **2018**, *111*, 283–292. [RéfCroisée]
7. Rombaut, A. ; Guilhot, R.; Xuéreb, A.; Benoît, L.; Chapuis, député; Gibert, P.; Fellous, S. Envahissant *Drosophila suzukii* Facilite *Drosophila melanogaster* Infestations et foyers de pourriture aigre dans les vignobles. *R. Soc. Ouvrez SCI.* **2017**, *4*, 170117. [RéfCroisée]
8. Mazzi, D. ; Bravin, E.; Meraner, M.; Doigt, R. ; Kuske, S. Impact économique de l'introduction et de l'établissement de *Drosophila suzukii* sur la production de cerises douces en Suisse. *Insectes* **2017**, *8*, 18. [RéfCroisée]
9. Gress, BE ; Zalom, FG Identification et évaluation des risques de résistance au spinosad dans une population californienne de *Drosophila suzukii*. *Gestion des nuisibles Sci.* **2019**, *75*, 1270–1276. [RéfCroisée]
10. Klassen, W.; Curtis, CF; Hendrichs, J. Histoire de la technique des insectes stériles. Dans *Technique des insectes stériles*; CRC Press : Berlin/Heidelberg, Allemagne, 2021 ; p. 1–44. [RéfCroisée]
11. Serebrovsky, AS Sur la possibilité d'une nouvelle méthode de lutte contre les insectes nuisibles. *Zool. Zhurna* **1940**, *19*, 618–630.
12. Vanderplank, FL Hybridation entre *Glossina* Espèces et nouvelle méthode suggérée pour le contrôle de certaines espèces de glossines. *Nature* **1944**, *154*, 607–608. [RéfCroisée]
13. Knippling, EF Possibilités de contrôle ou d'éradication des insectes grâce à l'utilisation de mâles sexuellement stériles. *J. Econ. Entomol.* **1955**, *48*, 459–462. [RéfCroisée]
14. Runner, GA Effet des rayons Röntgen sur le coléoptère du tabac ou de la cigarette et résultats d'expériences avec une nouvelle forme de tube Röntgen. *J. Agric. Rés.* **1916**, *6*, 383–388.
15. Muller, HJ La production de mutations par rayons X. *Proc. Natl. Acad. Sci. Etats-Unis* **1928**, *14*, 714–726. [RéfCroisée] [PubMed]
16. Lindquist, AW Contrôle des populations d'insectes par la technique stérile-mâle: rapport complet d'un panel tenu à Vienne, Autriche, 16-19 octobre 1962; série de rapports techniques ; Agence internationale de l'énergie atomique : Vienne, Autriche, 1963.
17. Bushland, RC ; Hopkins, DE Expériences avec des mouches à vis stérilisées par rayons X. *J. Econ. Entomol.* **1951**, *44*, 725–731. [RéfCroisée]
18. Lindquist, AW L'utilisation du rayonnement gamma pour le contrôle ou l'éradication du ver à vis. *J. Econ. Entomol.* **1955**, *48*, 467–469. [RéfCroisée]
19. Bourtzis, K. ; Vreysen, MJB Technique des insectes stériles (assis) et ses applications. *Insectes* **2021**, *12*, 638. [RéfCroisée]
20. Sassù, F.; Nikolouli, K.; Caravantes, S.; Taret, G.; Pereira, R.; Vreysen, MJB; Stauffer, C.; Cunceres, C. Élevage en masse de *Drosophila suzukii* pour l'application de la technique des insectes stériles : évaluation de deux systèmes de ponte. *Insectes* **2019**, *dix*, 448. [RéfCroisée]
21. Kruger, AP ; Schlesener, DCH; Martins, LN; Wollmann, J.; Amortun, M. ; Garcia, FRM Effets de la dose d'irradiation sur l'induction de la stérilité et les paramètres de qualité de *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *J. Econ. Entomol.* **2018**, *111*, 741–746. [RéfCroisée]
22. Lanouette, G. ; Brodeur, J.; Fournier, F.; Martel, V.; Vreysen, M.; CunCérès, C. ; Firlej, A. La technique des insectes stériles pour la gestion de la drosophile à ailes tachetées, *Drosophila suzukii*. Établissement de la dose d'irradiation optimale. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0180821. [RéfCroisée]
23. Kruger, AP ; Schlesener, DCH; Martins, LN; Wollmann, J.; Amortun, M. ; Garcia, FRM Effets des rayonnements sur *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) Comportement reproducteur. *J. Appl. Entomol.* **2019**, *143*, 88–94. [RéfCroisée]
24. Lanouette, G. ; Brodeur, J.; Fournier, F.; Martel, V.; Firlej, A. Effet de l'irradiation sur la capacité d'accouplement et la compétitivité des *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) pour le développement de la technique de l'insecte stérile. *Pouvez. Entomol.* **2020**, *152*, 563–574. [RéfCroisée]
25. Winkler, A. ; Jung, J.; Kleinhenz, B.; Racca, P. Un examen des effets de la température et de l'humidité sur *Drosophila suzukii* Les dynamiques de population. *Agric. Pour. Entomol.* **2020**, *22*, 179–192. [RéfCroisée]
26. Kanzawa, T. Études sur *Drosophila suzukii* (Mats.) Kofu, Yamanashi Agricultural Experiment Station 49 Pp. *Rév. Appl. Entomol.* **1939**, *29*, 622.
27. Leach, H. ; Stone, J.; Van Timmeren, S.; Isaacs, R. Induction saisonnière et spécifique au stade de la morphologie hivernale de la drosophile à ailes tachetées (Diptera: Drosophilidae). *J. Insect Sci.* **2019**, *19*, 5. [RéfCroisée]
28. Wallingford, Alaska ; Loeb, GM Acclimatation développementale de *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) et son effet sur la diapause et la tolérance au stress hivernal. *Environ. Entomol.* **2016**, *45*, 1081–1089. [RéfCroisée]

29. Papanastasiou, S.A.; Rodovite, V.G.; Verykoui, E.; Bataka, E.P.; Papadopoulos, N.T. Adaptation d'un ravageur envahissant à de nouveaux environnements : caractéristiques du cycle biologique de *Drosophila suzukii* dans les zones côtières et continentales de la Grèce pendant l'hivernage. *La biologie* **2021**, *dix*, 727. [RéfCroisée]
30. Panneau, A.D.C.; Zeeman, L.; van der Sluis, B.J.; van Elk, P.; Pannebakker, B.A.; Wertheim, B.; Helsen, H.H.M. a passé l'hiver *Drosophila suzukii* Sont la principale source d'infestations des premières cultures fruitières de la saison. *Insectes* **2018**, *9*, 145. [RéfCroisée]
31. Zerulla, F.N.; Schmidt, S.; Streitberger, M.; Zebitz, C.P.W.; Zelger, R. Sur la capacité d'hivernage des *Drosophila suzukii* au Tyrol du Sud. *J. Berry Res.* **2015**, *5*, 41–48. [RéfCroisée]
32. Stockton, D.; Wallingford, A.; Rendon, D.; Fanning, P.; Vert, C.K.; Diepenbrock, L.; Ballman, E.; Walton, V.M.; Isaacs, R.; Leach, H.; et coll. Les interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques affectent la survie en hivernage *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *Environ. Entomol.* **2019**, *48*, 454–464. [RéfCroisée]
33. Clymans, R.; Van Kerckvoorde, V.; Belien, T.; Bylemans, D.; De Clercq, P. Marquage *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) avec Poussières Fluorescentes. *Insectes* **2020**, *11*, 152. [RéfCroisée] [PubMed]
34. Kirkpatrick, sous-ministre; Intestin, L.J.; Miller, J.R. Développement d'une nouvelle conception de piège sec et collant incorporant des repères visuels pour *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *J. Econ. Entomol.* **2018**, *111*, 1775–1779. [RéfCroisée] [PubMed]
35. Fontaine, Montana; Badiee, A.; Hemer, S.; Delgado, A.; Mangan, M.; Dowding, C.; Davis, F.; Pearson, S. L'utilisation de films de blocage du spectre lumineux pour réduire les populations de *Drosophila suzukii* Matsumura dans les cultures fruitières. *Sci. représentant* **2020**, *dix*, 15358. [RéfCroisée] [PubMed]
36. Larson, N.R.; Strickland, J.; Boucliers, V.D.; Biondi, A.; Zappalun, L.; Cavallaro, C.; Colazza, S.; Escudero-Colomar, L.-A.; Briem, F.; Vogt, H.; et coll. Détection et surveillance de *Drosophila suzukii* dans les vergers de framboises et de cerisiers avec des composés organiques volatils aux États-Unis et en Europe. *Sci. représentant* **2021**, *11*, 6860. [RéfCroisée]
37. Espions, J.M.; Liburd, O.E. Comparaison des attractifs, des insecticides et du piégeage de masse pour la gestion *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) dans les Myrtilles. *Fla. Entomol.* **2019**, *102*, 315–321. [RéfCroisée]
38. Hampton, E.; Koski, C.; Barsoian, O.; Faubert, H.; Cowles, R.S.; Alm, S.R. Utilisation de cultivars à maturation précoce pour éviter l'infestation et le piégeage de masse pour gérer *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans *Vaccinium Corymbosum* (Ericales : Ericaceae). *J. Econ. Entomol.* **2014**, *107*, 1849–1857. [RéfCroisée]
39. Équipe de base R.R. : *un langage et un environnement pour le calcul statistique*; R Foundation for Statistical Computing : Vienne, Autriche, 2021.
40. Niebylski, M.L.; Craig, G.B.J. Dispersion et survie des *Aedes albopictus* dans un parc à ferraille dans le Missouri. *Confiture. Mosq. Contrôle Assoc.* **1994**, *dix*, 339–343.
41. Bates, D.; Machler, M.; Bolker, B.M.; Walker, S.C. Ajustement de modèles linéaires à effets mixtes à l'aide de lme4. *J. Stat. Logiciel* **2015**, *67*, 1–48. [RéfCroisée]
42. Lenth, R.; Singmann, H.; Amour, J.; Buerkner, P.; Herve, M. Emmeans : Moyennes marginales estimées, ou moyennes des moindres carrés. Package R version 1.7.1-1. Disponible en ligne : <https://cran.r-project.org/package=emmeans> (consulté le 1er mars 2022).
43. Wang, X.; Stewart, T.J.; Biondi, A.; Chávez, B.A.; Ingels, C.; Caprile, J.; Accordez, J.A.; Walton, V.M.; Daane, K.M. Dynamique des populations et écologie de *Drosophila suzukii* en Californie centrale. *J. Pest Sci.* **2016**, *89*, 701–712. [RéfCroisée]
44. Becker, N.; Langentepe-Kong, S.M.; Tokatlian Rodriguez, A.; Oh, T.T.; Reichle, D.; Lühken, R.; Schmidt-Chanasit, J.; Luthy, P.; Puggioli, A.; Bellini, R. Contrôle intégré de *Aedes Albopictus* dans le sud-ouest de l'Allemagne soutenu par la technique de l'insecte stérile. *Vecteurs parasites* **2022**, *15*, 9. [RéfCroisée]
45. Gato, R.; Hommeséndez, Z.; Prieto, E.; Argileés, R.; Rodríguez, M.; Baldoquén, W.; Hernunndez, Y.; Pérez, D.; Anaya, J.; Fuentes, I.; et coll. Technique de l'insecte stérile : suppression réussie d'un *Aedes aegypti* Population de terrain à Cuba. *Insectes* **2021**, *12*, 469. [RéfCroisée] [PubMed]
46. Clymans, R.; Van Kerckvoorde, V.; Thys, T.; De Clercq, P.; Bylemans, D.; Belien, T. Piégeage de masse *Drosophila suzukii*, Que faudrait-il ? Une étude de terrain de deux ans sur l'interférence des pièges. *Insectes* **2022**, *13*, 240. [RéfCroisée] [PubMed]
47. Sassù, F.; Bakhoun, Montana; Bouyer, J.; Cunceres, C. Compétitivité d'accouplement du mâle stérile *Drosophila suzukii* sous différentes conditions atmosphériques. *Procédure* **2021**, *68*. [RéfCroisée]
48. Sassù, F.; Nikoloulou, K.; Pereira, R.; Vreysen, M.J.B.; Stauffer, C.; Cunceres, C. Réponse à la dose d'irradiation sous hypoxie pour l'application de la technique de l'insecte stérile dans *Drosophila suzukii*. *PLoS ONE* **2019**, *14*, e0226582. [RéfCroisée] [PubMed]
49. Hernunndez, E.; Orozco, D.; Breceda, S.F.; Domjenguez, J. Dispersion et longévité des animaux sauvages et élevés en masse *Anastrepha Ludens* et *Anastrepha Obliqua* (Diptères : Tephritidae). *Fla. Entomol.* **2007**, *90*, 123–135. [RéfCroisée]
50. Chen, Y.; Pan, H.; Li, J.; Pan, D.; Liu, P.; Hu, H. Effets du mâle stérile irradié et de la séquence d'accouplement sur la fertilité de *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *J. Insect Sci.* **2022**, *22*, 1–5. [RéfCroisée]
51. Déchirerón, P.; McInnis, D.; Lance, D.; Stewart, J. Medfly (Diptera: Tephritidae) Sexage génétique : Comparaison à grande échelle sur le terrain des lâchers de mouches stériles mâles et bisexuelles au Guatemala. *J. Econ. Entomol.* **2004**, *97*, 1547–1553. [RéfCroisée]
52. Rodriguez-Saona, C.; Firbas, N.; Hernunndez-Cumplido, J.; Holdcraft, R.; Michel, C.; Palacios-Castro, S.; Silva, D.B. Interpreting Temporal and Spatial Variation in Spotted-Wing Drosophila (Diptera: Drosophilidae) Trap Captures in Highbush Blueberries. *J. Econ. Entomol.* **2020**, *113*, 2362–2371. [RéfCroisée]
53. Kirkpatrick, sous-ministre; Intestin, L.J.; Miller, J.R. Estimation de la portée du panache de surveillance et de la zone de piégeage pour *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans Michigan Tart Cherry. *J. Econ. Entomol.* **2018**, *111*, 1285–1289. [RéfCroisée]

- 
54. Vacas, S.; Primo, J.; Manclús, JJ; Montoya, UN.; Navarro-Llopis, V. Enquête sur *Drosophile suzuki* Capacités naturelles de dispersion à court terme à l'aide de la technique de marquage-libération-recapture. *Insectes* **2019**, *dix*, 268. [[RéfCroisée](#)]
55. Tait, G. ; Grassi, A.; Pfab, F. ; Crava, CM ; Dalton, DT ; Magarey, R.; Ometto, L.; Vezzulli, S.; Rossi-Stacconi, MV ; Gottardello, UN.; et coll. Dynamique spatiale à grande échelle de *Drosophile suzuki* dans le Trentin, en Italie. *J. Pest Sei.* **2018**, *91*, 1213-1224. [[RéfCroisée](#)]
56. Klick, J. ; Yang, WQ; Walton, VM; Dalton, DT ; Hagler, JR; Dreves, AJ ; Lee, JC; Bruck, DJ Distribution et Activité de *Drosophile Suzuki* dans la framboise cultivée et la végétation environnante. *J. Appl. Entomol.* **2016**, *140*, 37-46. [[RéfCroisée](#)]