

Article

# La modélisation *Drosophile suzuki* Populations masculines adultes : une approche basée sur la physiologie avec validation

Luca Rossini \* , Mario Contarini \*, Federica Giarruzzo, Matteo Assennato et Stefano Speranza

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE), Università degli Studi della Tuscia, Via San Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo, Italie; federicagiarruzzo@yahoo.it (FG); matteoassennato@yahoo.it (MA); speranza@unitus.it (SS)

\* Correspondance : luca.rossini@unitus.it (LR) ; contarini@unitus.it (MC)

Reçu : 14 octobre 2020 ; Accepté : 30 octobre 2020 ; Publié: 31 octobre 2020

**Résumé simplifié :** *Drosophile suzuki* est un insecte ravageur nuisible qui infeste les cultures de fruits rouges dans le monde entier. Ces dernières années, elle s'est propagée sur de nouveaux territoires, favorisée par sa capacité d'adaptation à de nouveaux environnements. En raison de la réduction sévère des rendements dans les champs cultivés, principalement due aux activités d'alimentation et de ponte, plusieurs études ont été menées du côté des stratégies de lutte. Cependant, le coût des principes actifs et la sauvegarde de l'environnement et de la santé humaine ont conduit les scientifiques à introduire de nouveaux outils d'aide à la décision. Parmi ces derniers, les modèles mathématiques jouent un rôle important, de par leur capacité à synthétiser un pool d'informations biologiques telles que les relations entre l'espèce et le milieu extérieur. Le développement et la validation de modèles mathématiques décrivant fidèlement le cycle de vie des ectothermes, comme les insectes, fournissent des outils fiables à utiliser dans un cadre de lutte intégrée contre les ravageurs. Ce travail étend l'application d'un modèle à base physiologique dans l'étude de cas de *D. suzuki*, fournissant une validation dans le cas d'un insecte ravageur pertinent en agriculture, et une estimation précise d'un ensemble de paramètres biologiques.

**Abstrait:** La drosophile à ailes tachetées (SWD), *Drosophila suzuki* (Matsumura), est un insecte nuisible pour les cultures de fruits rouges. Même si ses principaux hôtes appartiennent aux genres *Prunus* et *Rubus*, sa polyphagie élevée et sa capacité d'adaptation à de nouveaux environnements en font un problème sérieux pour les agriculteurs du monde entier, qui ont signalé plusieurs pertes économiques à cause de ce ravageur. Une large série de propositions pour lutter contre la DAT sont disponibles et fonctionnent conformément aux mécanismes de la lutte intégrée contre les ravageurs, démontrant leur grande efficacité lorsqu'elles sont appliquées au moment opportun. Ce travail vise à appliquer et valider un modèle à base physiologique qui résume toutes les informations disponibles sur

*D. suzuki* la biologie, comme la relation entre la température ambiante et son développement, les taux de fécondité et de mortalité. Le modèle a fourni, par conséquent, une description d'une population de femelles SWD en tenant compte des multiples générations qui se sont produites au cours de l'année. Les simulations ont ensuite été comparées aux données de terrain recueillies lors d'une enquête de trois ans dans deux champs expérimentaux situés dans la région de Sabina Romana (Latium, Italie). Plus précisément, *D. suzuki* mâles ont été suivis avec des pièges dans des champs cultivés avec des variétés mixtes de cerises et ils ont été sélectionnés en raison de leur identification plus claire par rapport aux femelles. Les résultats ont montré un haut niveau de fiabilité des simulations dans la représentation des données de terrain, soulignant en même temps qu'il n'y a pas d'écart dans la simulation

*D. suzuki* femmes pour représenter les populations masculines.

**Mots clés:** modèles de croissance; protection des cultures; lutte intégrée contre les nuisibles; modèles structurés par âge; l'équation de Von Foerster généralisée ; systèmes d'aide à la décision

## 1. Introduction

*Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera : Drosophilidae), également connu sous le nom de drosophile à ailes tachetées (SWD), est un insecte ravageur nuisible pour les cultures de fruits rouges dans le monde entier. Sa nocivité est amplifiée par sa forte polyphagie et par sa capacité de colonisation et d'adaptation dans de nouveaux territoires. Pour cette raison, en fait, il s'est propagé depuis le Japon, sa terre d'origine [1], en Asie, en Amérique du Nord et du Sud [2,3] et Europe [4]. Plus précisément, le premier signalement européen de l'insecte remonte à 2008 en Espagne [5] et l'Italie [6] et depuis son introduction, sa diffusion sur tout le continent européen a été rapide. En particulier en Italie, le premier foyer a été enregistré dans la région du Trentin Haut-Adige [7], entraînant des pertes de rendement importantes dans les cultures de fruits rouges. Dans le Trentin Haut-Adige, les pertes ont été estimées à environ 25 à 35 % [7] du rendement, tandis qu'en Amérique du Nord, les dommages ont été plus élevés, allant de négligeables à 80 % [8] selon la région.

Au cours de la dernière décennie, la propagation de *D. suzukii* en Italie s'est poursuivie du nord au centre du pays [6], favorisée par la présence de plantes hôtes sauvages et cultivées.

Bien que les cerisiers, les fraisiers et les bleuets semblent être préférés par *D. suzukii*, des infestations ont également été signalées sur des pommes, des raisins, des pêches et d'autres espèces appartenant aux genres *Prunus* et *Rubus* [2,7,9]. Les dégâts causés par la DAT aux plantes hôtes sont principalement dus à la ponte et au développement larvaire ; les larves se nourrissent du tissu de l'endocarpe, rendant les fruits invendables et représentant une porte d'accès pour les hôtes secondaires responsables de maladies fongiques ou bactériennes [6].

Réductions importantes des rendements, avec des pertes économiques subséquentes [dix], sont encore amplifiées par la capacité de l'insecte à atteindre jusqu'à 15 générations en une seule année [5]. En effet, dans des conditions favorables, la DAT peut trouver refuge sur la végétation sauvage puis réinfester les champs cultivés [7].

Dans des conditions normales, les femelles adultes pondent en moyenne 300 à 400 œufs [9] sur les fruits en train de mûrir à l'aide d'un ovipositeur dentelé. Même si les femelles pondent des œufs sur des fruits au hasard, il est possible que plusieurs femelles pondent jusqu'à trois œufs dans un seul fruit. Les œufs éclosent au bout de deux à trois jours en moyenne [5], et les larves se développent généralement à l'intérieur du même fruit hôte. La durée totale du stade larvaire est estimée à environ 8–13 jours, et elle est suivie d'une courte nymphose à l'intérieur du même fruit ou dans le sol. Ainsi, en 15 à 18 jours en moyenne, les œufs deviennent adultes [11,12] prêt pour l'accouplement et la ponte dans un délai de deux jours après l'émergence [7]. La ponte d'une seule femelle peut se poursuivre jusqu'à sept jours et, en raison de la courte durée de l'ensemble du cycle de vie, il est courant de signaler le chevauchement de plusieurs générations.

Les adultes mesurent 2 à 3 mm de long et présentent un dimorphisme sexuel [5] : les mâles sont clairement identifiés par deux taches noires sur les ailes [3], tandis que les femelles peuvent être confondues avec d'autres *Drosophila* espèces, nécessitant des instruments optiques et des techniciens experts pour leur identification.

Selon le type de régime, les mâles ont un seuil thermique plus élevé (30°C) que les femelles (28°C) bien que les premiers ne soient pas fertiles à des températures élevées [12]. Dans l'ensemble, le SWD peut survivre dans des conditions thermiques allant de 5 à 30°C, avec la température optimale pour le développement et la reproduction autour de 25–28°C [7,13]. En conséquence, dans la région méditerranéenne, son activité est la plus élevée au printemps et en automne, avec une réduction significative des populations pendant les étés chauds et secs [14].

Depuis *D. suzukii* est responsable d'importantes réductions de rendement, une série de stratégies de contrôle ont été proposées pour limiter les épidémies et réduire les dégâts causés. La plupart d'entre eux sont basés sur l'utilisation de produits agrochimiques tels que les insecticides à large spectre [6,15], mais les lois de plus en plus restrictives en matière d'utilisation des pesticides incitent les chercheurs à rechercher des stratégies de lutte alternatives, telles que l'utilisation d'ennemis naturels [16–20].

A cet effet, pour favoriser l'activité des ennemis naturels de la DAT, une série de stratégies agronomiques peuvent également être utilisées, comme une gestion correcte de la végétation sauvage entourant les champs cultivés [21], l'utilisation de variétés végétales moins sensibles ou à maturation précoce ou tardive [22].

Les stratégies de contrôle susmentionnées nécessitent une planification minutieuse qui peut être étayée par des modèles mathématiques. Modèles décrivant *D. suzukii* les populations ont été proposées pour la première fois par Coop et al. [23] et Damus et al. [24], dans le but de les utiliser dans des systèmes d'aide à la décision pour les agriculteurs et les techniciens.

Cette étude vise à appliquer et valider le modèle à base physiologique introduit par Rossini et al. [25,26] dans le cas de *D. suzukii*. En particulier, ce modèle décrit des populations de

ectothermes qui se développent au fil du temps et au cours de leurs étapes de vie, y compris les informations biologiques et les facteurs environnementaux. Par conséquent, sur la base de ces caractéristiques, il peut être un candidat de système d'aide à la décision fiable qui peut intégrer les informations déjà disponibles sur les taux de fécondité et de mortalité. [15] ou la relation entre la température ambiante et le temps de développement moyen [12]. Les populations simulées ont ensuite été validées avec des données collectées lors d'une enquête de trois ans menée dans deux champs de cerisiers cultivés situés dans la région de Sabina Romana (Latium, Italie). La réponse du modèle s'est concentrée sur une période restreinte de l'année (avril-juillet, selon la saison) où les fruits (dans les champs étudiés) se développent, deviennent sensibles aux attaques de DAT et nécessitent le plus de stratégies de contrôle.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Modélisation de la population masculine

L'application d'un modèle mathématique pour les systèmes d'aide à la décision en agriculture nécessite généralement une simplification du phénomène réel. Ainsi, avant d'introduire le modèle, il est important de rappeler le principal compromis de ce travail : le choix de simuler uniquement des populations masculines. Les raisons de ce choix sont étayées par deux caractéristiques biologiques pertinentes du SWD. Comme déjà indiqué, les mâles sont clairement identifiables par des taches noires sur les ailes, tandis que les femelles nécessitent une analyse plus approfondie de l'ovipositeur afin d'être distinguées des autres espèces de *Drosophila*. Dès lors, il était plus simple de former des techniciens à la collecte des données expérimentales, sans changer le sens de l'expérimentation. En revanche, Emiljanowicz et al. [27] ont rapporté à la suite de leur étude un sex-ratio de 1:1 (hommes: femmes) pour les SWD. Ainsi, avec une bonne approximation, il est possible de considérer la population masculine comme similaire à la population féminine.

Avec cette condition préalable, introduisons le modèle physiologique appliqué pour décrire *D. suzukii* populations évoluant dans le temps  $t$  et à travers les étapes de la vie  $X$ . La fonction de densité de population est donc représentée par une fonction à deux variables  $M(t, X)$ , solution de l'équation aux dérivées partielles du premier ordre suivante [25,26,28] :

$$\begin{aligned} \frac{\partial M(t, X)}{\partial t} + \frac{\partial [g(t, X) M(t, X)]}{\partial X} &= -M(t, X) M(t, X) \\ M(t, 0) &= \int_0^{X_m} \beta(t, X) M(t, X) dX \\ M(0, X) &= n_0(X) \end{aligned} \quad (1)$$

L'équation (1) considère tous les éléments fondamentaux pour une description fiable des populations ectothermes. Premièrement, le développement à travers les étapes de la vie est guidé par une « fonction de taux de développement généralisé »,  $g(t, X)$ , qui exprime, de manière générale, la relation entre l'espèce, les paramètres environnementaux et d'autres facteurs biologiques comme le vieillissement. En procédant par ordre, l'autre fonction pertinente contenant des informations biologiques est la « fonction de taux de mortalité généralisée »,  $M(t, X)$ . Cette fonction peut considérer tous les facteurs biotiques et abiotiques qui peuvent exprimer la mortalité, en raison de sa dépendance aux variables de temps et d'âge. La condition aux limites, quant à elle, décrit les mécanismes de reproduction, puisqu'elle représente le nombre de nouveaux individus entrant dans la première étape. Plus précisément, la reproduction est régulée par une « fonction de fécondité généralisée »,  $\beta(t, X)$ , qui dépend aussi dans ce cas du temps et de l'âge. Ainsi, la condition aux limites fournit l'entier des nouveaux individus produits par la population entre les âges physiologiques 0 et  $X_m$ . La dernière composante de l'équation est la condition initiale, qui exprime la répartition par classe d'âge de la population au temps zéro.

L'équation (1) a donc la capacité de résumer toutes les informations disponibles à partir d'autres études biologiques comme, par exemple, la fécondité, la mortalité et la relation avec l'environnement extérieur. Cependant, il a été formulé avec les hypothèses les plus larges possibles pour les fonctions  $g(t, X)$ ,  $M(t, X)$  et  $\beta(t, X)$ , comme le suggère le mot « généralisé ». Néanmoins, à ce jour, certaines informations biologiques manquent et une série de simplifications est nécessaire. Le problème principal est lié aux paramètres environnementaux : en effet, il n'y a pas de fonctions analytiques pour représenter la variation de la

température moyenne quotidienne ou humidité relative tout au long de l'année [29–31]. En conséquence, il n'y a pas de possibilité de calculer des solutions analytiques pour l'équation (1), et cela rend nécessaire l'utilisation de solutions numériques, afin d'augmenter la précision des simulations. Un schéma numérique a été proposé par Rossini et al. [25] dans leur première formulation du modèle, et il prévoit une utilisation combinée du schéma au vent et de la méthode des différences finies d'Euler [32]. Plus précisément, cette méthodologie consiste en une approximation vers l'arrière de la dérivée partielle sur la variable d'âge, et une approximation vers l'avant de la dérivée partielle sur la variable de temps, fournissant le schéma suivant :

$$N_{je+1} = g_{je} N_{je} + N_{je} \left[ 1 - 2g_{je} + g_{je-1} - j M_{je}^d \right] \quad (2)$$

$$N_{je} = \sum_{h=0}^{h_{\max}} \beta_{je} N_{je,h}$$

$$N_{0,j} = N_0$$

Pour éviter toute confusion entre variables continues et discrètes, dans le schéma numérique (2) l'âge discret est représenté par le  $h$  variable, tandis que le temps est représenté par  $j$ . La notation a également été modifiée pour les fonctions de développement, de fécondité et de mortalité, dont les lettres  $g$ ,  $M$  et  $\beta$  ont été maintenus, mais les dépendances du temps et de l'âge sont écrites respectivement sous forme de sommets et d'indices.

Le schéma numérique (2) est la discrétisation de l'équation (1) dans sa forme la plus générale mais, comme indiqué dans les sections suivantes, d'autres simplifications seront nécessaires.

Depuis *D. suzukii* est une espèce multivoltine, le suivi de terrain de la première génération a été inséré dans le schéma numérique (2) comme condition aux limites, suivant la stratégie déjà appliquée dans les travaux de Rossini et al. [26,31,32]. Par la suite, les générations suivantes seront simulées à l'aide de la fonction de fécondité  $\beta_{je}$ , dont une discussion est explorée dans la section 2.2.

Les solutions numériques peuvent être calculées en insérant le schéma numérique (2) dans n'importe quel logiciel de calcul ou implémenté dans un code de langage de programmation. Spécifiquement pour ce travail, le choix a été d'inclure le schéma (2) dans un logiciel spécialisé écrit combinant le langage de programmation C/C++ avec des bibliothèques du logiciel open source ROOT [33,34]. Ce logiciel de calcul a déjà été introduit par Rossini et al. [26,29] et nommé *EntoSimName*.

En analysant plus en profondeur le modèle (1) proposé pour simuler les populations de DAT, il est possible de remarquer qu'il est plus approprié pour décrire une population de femelles, alors que le suivi n'a été effectué que sur *D. suzukii* mâles en raison de leur identification plus facile. Par conséquent, comme discuté au début de la présente section, il devient fondamental de s'assurer que le modèle est capable de représenter plusieurs générations. Ainsi, même si la validation se fera en comparant des simulations avec des populations masculines, les simulations seront calculées en considérant une population féminine.

## 2.2. Fonctions de développement, de fécondité et de taux de mortalité

### 2.2.1. Fonctions de taux de développement

Examinons plus en détail les fonctions de développement, de fécondité et de taux de mortalité contenues dans l'équation (1) et son schéma discret (2). Leur rôle est fondamental pour une application correcte du modèle car ils contiennent les informations biologiques sur l'espèce ; cependant, comme déjà indiqué dans la section 2.1, des simplifications sont nécessaires dans ce cas.

Par ordre d'apparition, la fonction de taux de développement généralisé  $g(t, X)$  est la première expression à discuter. Dans sa forme générale, il est capable d'exprimer toutes les caractéristiques de l'espèce en fonction du temps et de l'âge physiologique. Dans la littérature, une série d'expressions décrivant la relation entre l'espèce et la température ambiante sont disponibles [35,36], mais aucun d'entre eux n'inclut la dépendance à la variable d'âge et d'autres paramètres environnementaux tels que l'humidité relative ou la photopériode. Malgré cette limitation, l'approximation consistant à considérer la température comme principale variable déterminante pour le développement des insectes à travers leurs stades de vie est raisonnable et est utilisée depuis longtemps [35–37]. D'où la fonction  $g(t, X)$  ne dépend que du temps, car la température est supposée varier dans le temps dans un contexte de champ ouvert.

Par définition, le taux de développement est l'inverse du temps moyen de développement [37,38], et différents auteurs ont rapporté des expressions mathématiques pour la relier à la température extérieure. Pour poursuivre le but de ce travail, les expressions qui ont été considérées étaient :

- Le Brière fonction de taux de développement [39] :

$$g[T] = \frac{1}{\frac{1}{T - T_L} + \frac{1}{T_M - T}} \quad (3)$$

où  $T$  est la température ambiante,  $T_L$  et  $T_M$  sont des paramètres empiriques,  $T_L$  et  $T_M$  sont respectivement les seuils thermiques supérieur et inférieur en dessous et au dessus desquels le développement de l'espèce n'est théoriquement pas possible.

- La fonction taux de développement Logan [40] :

$$g[T] = \psi \exp(\rho T) - \exp(\rho T_M) \left( \frac{T_M - T}{\Delta T} \right) \quad (4)$$

où  $T$  est la température ambiante,  $\psi$  et  $\rho$  sont des paramètres empiriques,  $T_M$  est le seuil thermique supérieur au-delà duquel le développement de l'espèce n'est théoriquement pas possible, et  $\Delta T$  est la plage entre le maximum de la fonction et  $T_M$ .

- La fonction de taux de développement de Sharpe et De Michele [41,42] :

$$g[T] = \frac{\exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{C}{T - T_0}\right)}{1 + \exp\left(\frac{E}{T - T_0}\right)} \quad (5)$$

où  $T$  est la température ambiante,  $UN$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $r$ ,  $E$ ,  $F$  sont des paramètres liés à la cinétique enzymatique de l'organisme [25,43].

L'estimation des paramètres des équations (3)–(5) nécessite une série d'expériences en enceinte climatique à température constante à condition, dans le cas de *D. sukui*, par Tochen et al. [12]. Plus précisément, les données de ce type sont appelées "tables de mortalité", et représentent un outil puissant pour en savoir plus sur la biologie des insectes [44]. Les tables de mortalité publiées par Tochen et al. [12] ont été utilisées pour estimer les paramètres de la fonction de meilleur ajustement à travers la *Minuit* algorithme contenu dans le logiciel ROOT [45], comme décrit par Rossini et al. [26,28].

Une fois que les meilleurs paramètres d'ajustement étaient disponibles, la deuxième étape de l'application du modèle était le choix de l'expression la plus représentative des données des tables de mortalité à travers le "a priori analyse" proposée par Rossini et al. [26,28,30]. La méthode prévoit le choix de l'expression qui rapporte le meilleur résultat du  $\chi^2$  test et un  $R^2$  valeur proche de 1.

## 2.2.2. Fonction du taux de mortalité

En procédant dans l'ordre, discutons ensuite de la fonction du taux de mortalité. Une approximation utile de cette expression a été proposée par Asplen et al. [15], calculé sur la base des taux de survie de Tochen et al. [12], Dalton et al. [46] et Kinjio et al. [47]. Dans l'équation (1), la fonction du taux de mortalité a été présentée sous la forme généralisée  $M(t, X)$  y compris la dépendance aux variables de temps et d'âge. Cependant, la fonction d'Asplen et al. [15] ne considère que la mortalité induite par la température ambiante  $T$ , et, par conséquent, il ne tient pas compte de la variable d'âge. Mathématiquement parlant, la mortalité a été décrite par la fonction convexe polynomiale du second ordre suivante :

$$M(T) = 0,00035 \cdot (T - 15)^2 + 0,01 \quad (6)$$

### 2.2.3. Fonction du taux de fécondité

Le terme restant de l'équation (1) à discuter est le taux de fécondité  $\beta(t, \lambda)$ . Une proposition de fonction du taux de fécondité a été fournie par Asplen et al. [15], commodément modifiée pour être adaptée à l'équation (1).

Le premier terme de la fonction du taux de fécondité est l'expression de Bieri [48] :

$$\beta_1(t_{ae}) = \frac{H \cdot t_{ae}}{L t_{ae}} \quad (7)$$

où  $H$  et  $L$  sont des paramètres empiriques et  $t_{ae}$  est le temps après l'émergence des adultes. Selon cette hypothèse, le temps et l'âge dans l'équation (1) sont des variables différentes mais, à la lumière des simplifications supposées pour la fonction de taux de développement, le temps après l'émergence de l'adulte peut être calculé comme suit :

$$t_{ae} = t - \frac{1}{g(\lambda(t))} \quad (8)$$

En d'autres termes,  $t_{ae}$  peut être calculé en soustrayant le temps de développement moyen œuf-adulte fourni par la fonction de taux de développement  $g(\lambda(t))$  de la variable de temps  $t$ . La fonction de Bieri (7) décrit la diminution du taux de ponte des femelles à mesure qu'elles vieillissent, estimée à température constante (21°C dans le cas de *D. suzukii*).

Cependant, le taux de ponte dépend de la température, comme l'ont montré Tochen et al. [12]. Il faut donc un second terme dans la fonction du taux de fécondité qui considère les variations à cause de la température,  $\lambda(t)$ , changements:

$$\beta_2 = 1 - \frac{[\lambda(t) - j_1]^2}{j_2} \quad (9)$$

Dans l'équation (9),  $j_1$  et  $j_2$  sont des paramètres empiriques, et il s'agit d'un pourcentage de réduction de la fécondité exprimé par une fonction concave [15].

Le troisième terme intervenant dans l'expression du taux de fécondité est le sex-ratio, car on considère ainsi la portion d'œufs nouvellement produits, qui pourra fournir la descendance de la génération suivante :

$$RS = 0,5 \quad (\text{dix})$$

En combinant les expressions (7), (9) et (10), la fonction de taux de fécondité appliquée pour poursuivre l'objectif de ce travail était :

$$\beta(t, \lambda(t)) = RS \cdot \frac{H \cdot t_{ae}}{L t_{ae}} \cdot \left( 1 - \frac{[\lambda(t) - j_1]^2}{j_2} \right) \quad (11)$$

Les paramètres  $H$ ,  $L$ ,  $j_1$  et  $j_2$  ont été retrouvées par les travaux d'Asplen et al. [15], et répertorié dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Paramètres de la fonction du taux de fécondité d'Asplen et al. [15].

$\beta_1$		$\beta_2$	
Paramètre	Valeur numérique	Paramètre	Valeur numérique
$H$	0,585	$j_1$	20.875
$L$	1,0475	$j_2$	8.125

### 2.3. Analyse des données et comparaison entre les simulations et les données de terrain

La comparaison a été effectuée en utilisant le  $\chi^2$  fonction et le coefficient de détermination  $R^2$ , puisque cette méthodologie a été appliquée avec succès pour donner une idée claire du niveau de chevauchement entre les données de terrain et les simulations avec l'équation (1) [25,26,28,30,32].

Plus précisément, le  $\chi^2$  fonction est définie comme :

$$\chi^2 = \sum_{je=1}^n \frac{(O_{je} - E_{je})^2}{E_{je}} \quad (12)$$

où  $O_{je}$  est la  $j$ ème donnée observée,  $E_{je}$  est la  $j$ ème donnée simulée et  $n$  est le total des points à comparer. L'Équation (12) prend dans ce cas le sens d'indicateur de la distance, selon l'hypothèse qu'un  $\chi$  plus élevé signifie qu'il y a moins de chevauchement entre les simulations et les données de terrain. D'autre part, il se pourrait qu'avec des populations élevées, même une petite distance entre deux points puisse fournir un  $\chi$  élevé valeur, suggérant une faible fiabilité du modèle, même si celle-ci n'est pas vérifiée.

Pour cette raison, le coefficient de détermination  $R^2$  a été introduit pour supporter le  $\chi^2$  valeur.

Mathématiquement, il est défini par :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{je=1}^n (O_{je} - E_{je})^2}{\sum_{je=1}^n (O_{je} - \bar{O})^2} \quad (13)$$

où, encore une fois,  $O_{je}$  est la  $j$ ème donnée observée,  $E_{je}$  est la  $j$ ème donnée simulée et  $n$  est le total des points à comparer. Un  $R^2$  une valeur proche de 1 suggère que les données simulées ont une forte probabilité de rapporter la même tendance que les données de terrain, et pour cette raison c'est un indicateur fiable pour accompagner la fonction (12).

#### 2.4. Conception expérimentale pour la validation du modèle

La validation de l'équation (1) a été menée au cours des saisons de croissance 2017, 2018 et 2019 dans deux champs expérimentaux situés dans la région de Sabina Romana (Latium, Italie), dans les municipalités de Montelibretti et Monterotondo (uniquement saisons 2018 et 2019).

Ces champs faisaient partie d'un réseau de surveillance plus large mené par Agroambiente Lazio et ont été sélectionnés pour la validation du modèle en raison de la gestion biologique de la plantation et de leur proximité avec les stations météorologiques. Ces derniers étaient gérés par l'agence ARSIAL (Agence régionale pour le développement de l'innovation et de l'agriculture du Latium), qui a fourni les températures pour appliquer le schéma numérique (2). De plus, les données de température étant fournies quotidiennement, le plus petit pas de temps possible pour les simulations était d'un jour.

Les vergers expérimentaux avaient une surface moyenne de 2000 mètres carrés, cultivés avec un mélange de variétés de cerises locales, généralement récoltées aux mois de mai et juin, et avec une gestion agronomique similaire. La distance entre les deux vergers est d'environ 10 km.

Au centre des champs susmentionnés, trois Droso-Trap (Biobest, Westerloo, Belgique) attirés avec Droskidrink (Azienda Agricola Prantil, Priò, Trente, Italie) ont été déployés du 20 avril au 28 juin en 2017, du 19 avril au 12 juillet en 2018 et du 12 avril au 18 juillet en 2019.

Les pièges étaient suspendus à une hauteur de 1,5 à 1,8 m et vérifiés chaque semaine, lorsque, lors de chaque inspection, les pièges étaient vidés pour compter le nombre de mâles adultes et le leurre était renouvelé. Selon les précisions fournies par le constructeur, trois pièges dans chaque champ pouvaient couvrir toute la surface. Ainsi, la population de mâles sur le terrain a été représentée par la moyenne des trois casiers.

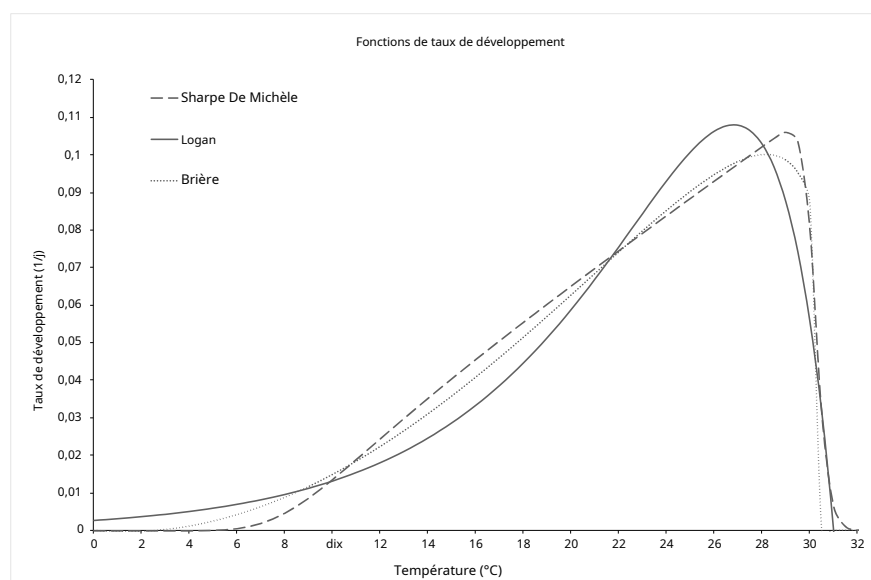
Chaque inspection hebdomadaire n'a fourni que le nombre de mâles SWD, tandis que la partie restante des insectes capturés a été analysée grossièrement et au hasard uniquement pour vérifier la présence de *D. suzukii* femelles.

### 3. Résultats

En suivant la ligne logique décrite dans la section 2, la première partie du travail porte sur l'estimation des paramètres des fonctions de taux de développement à partir des tables de mortalité des femelles DAT élevées sur cerisier rapportées par Tochen et al. [12]. Paramètres de meilleur ajustement,  $\chi^2$  et  $R^2$  les valeurs sont rapportées dans le tableau 2, tandis que les fonctions de meilleur ajustement sont représentées sur la figure 1.

**Tableau 2.** Paramètres de meilleur ajustement ( $\pm$ erreur standard) du Brière (3), Logan (4) et Sharpe et De Michele (5) fonctions de taux de développement estimées avec les données de Tochen et al. [12]. Pour chaque régression non linéaire, le  $\chi^2$ -valeur, la  $R^2$ -valeur et le nombre de degrés de liberté (NDF) ont été rapportés.

Fonction de taux	Paramètres	$\chi^2$ -Valeur	$R^2$ -Valeur	ACNP (n)
Brièreconcernant	$UN = (1.20 \pm 0.15) \times \text{dix}^{-4}$ $JL = 3 \pm 2$ $JM = 30 \pm 1$ $m = 6 \pm 3$	0,001389	0,994	3
Logan	$\psi = (3 \pm 1) \times \text{dix}^{-3}$ $\rho = 0,16 \pm 0,02$ $JM = 31 \pm 1$ $\Delta J = 3 \pm 1$	0,022202	0,886	3
Sharpe et De Michèle	$UN = (-1.2 \pm 0.4) \times \text{dix}^2$ $B = (-3 \pm 1) \times \text{dix}^3$ $C = (-1.2 \pm 0.4) \times \text{dix}^2$ $rE = (-3 \pm 1) \times \text{dix}^3$ $E = (-1.1 \pm 0.4) \times \text{dix}^2$ $F = (-3 \pm 1) \times \text{dix}^3$	0,000284	0,946	1



**Figure 1.** Représentation graphique de Brière (3), Logan (4) et Sharpe et De Michele (5) fonctions les mieux ajustées estimées avec les données de Tochen et al. [12]. Les valeurs numériques sont disponibles dans le tableau 2.

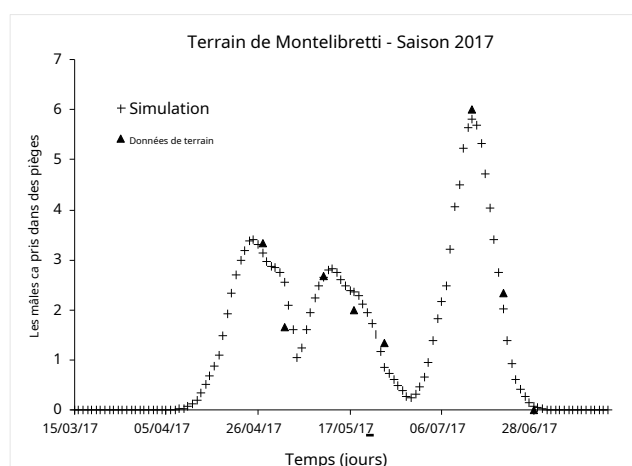
Avant de procéder aux simulations, il était nécessaire d'individualiser la fonction de taux de développement la plus fiable parmi les résultats susmentionnés, afin de l'utiliser dans le schéma numérique (2). Selon la *a priori* analyse, la Brière expression était la fonction la mieux adaptée aux tables de mortalité, avec une  $R^2$  valeur proche de 1 et  $P=0,99999$  du  $\chi^2$ test. D'autres informations utiles recueillies à partir de l'expression (3) étaient la température optimale pour le développement du SWD,  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ , et les seuils thermiques inférieur et supérieur  $JL$  et  $JM$ , respectivement (tableau 2). Par ordre de fiabilité, la Logan (4) était la deuxième meilleure expression, avec un  $R^2$  valeur proche de 1 et  $P=0,99912$  à partir du  $\chi^2$ test. Les coordonnées du maximum ont également été calculées pour l'expression de Logan, fournissant la température optimale pour le développement du SWD,  $(27 \pm 4)^\circ\text{C}$ . Cette valeur est conforme aux résultats de la Brièreconcernant.

Le Sharpe et De Michele (5) était la fonction la moins fiable pour ajuster les tables de mortalité, avec une  $R^2$ -valeur (même si elle était assez proche de 1), et avec  $P=0,98655$  de  $\chi^2$ test. La température optimale pour le développement SWD fournie par Sharpe et De Michele,  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ , est également conforme à la Logan et Brière expressions.



Depuis le Briél en est résulté la fonction de meilleur ajustement pour les tables de mortalité, celle-ci a été insérée dans le schéma numérique (2) afin d'évaluer les températures moyennes journalières fournies par les stations météorologiques.

La deuxième étape du travail a été la simulation de *D. suzuki* populations dans les deux champs expérimentaux. Puisqu'il n'y avait pas de suivi disponible pendant la saison de croissance 2017 pour le champ de Monterotondo, il n'a pas été simulé. Les simulations du champ de Montelibretti sont rapportées dans la figure 2. Au cours de cette saison de croissance, trois générations ont été simulées, signalant des pics les 25 avril, 14 mai et 15 juin. En comparaison, dans les données expérimentales, des pics ont été signalés le 27 avril, le 11 mai et le 15 juin.



**Figure 2.** Comparaison entre simulé et surveillé *D. suzuki* populations, nt les données des en 2017. Triangle les indicateurs représentent pièges, tandis que les croix indiquent des simulations.

L'évaluation numérique de la fiabilité des simulations est reportée dans le tableau 3: analyser le  $\chi^2$  et  $R^2$  valeurs, il est possible d'évaluer qu'il y a une bonne concordance entre les simulations et les données de terrain, même si les pics expérimentaux sont retardés de deux jours dans le cas de la première génération et anticipés de trois jours pour la seconde.

**Tableau 3.** Cohérence numérique entre les simulations et les données de terrain de *D. suzuki* populations masculines.

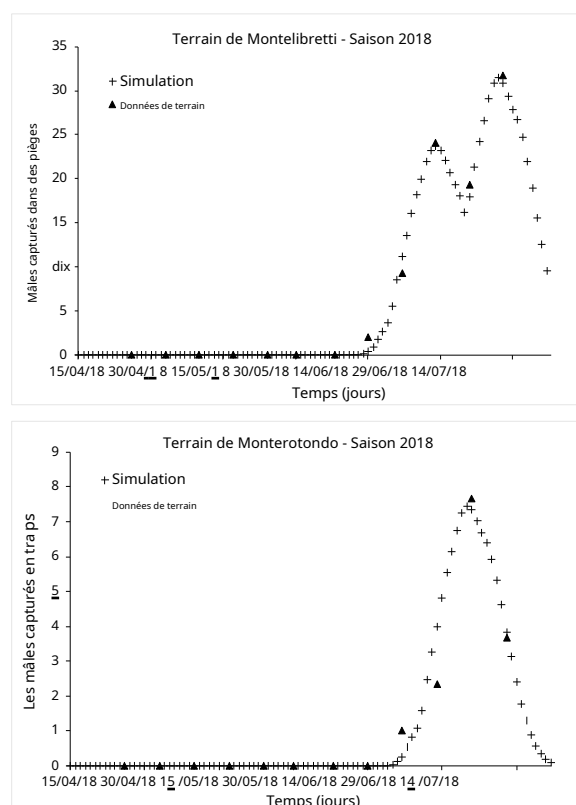
Saison de croissance	Champ expérimental	$\chi^2$ -Valeur	$R^2$ -Valeur
2017	Montelibretti	0,684	0,942
	Monterotondo	-	-
2018	Montelibretti	8.179	0,992
	Monterotondo	2.781	0,934
2019	Montelibretti	26.843	0,924
	Monterotondo	5.933	0,775

La deuxième année d'enquête, 2018, a présenté différents scénarios dans les champs expérimentaux. Deux générations ont été simulées dans le champ de Montelibretti (Figure 3), avec des pics simulés les 27 juin et 11 juillet, tandis que les données expérimentales rapportaient la même chose les 28 juin et 12 juillet.

La situation évaluée sur le champ de Monterotondo fait état d'une seule génération avec un pic simulé le 5 juillet, confirmé par les données expérimentales.

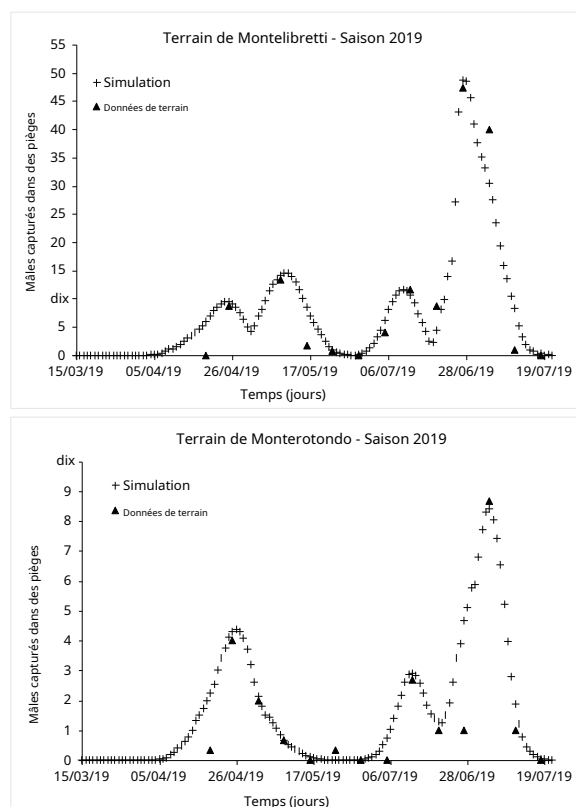
Le  $R^2$  et  $\chi^2$  valeurs répertoriées dans le tableau 3a mis en évidence une bonne réponse du modèle dans la représentation de la population expérimentale, puisque les premiers sont proches de 1 et les seconds relativement faibles, par rapport à l'abondance des populations de SWD.

La dernière année de l'enquête, 2019, a été la plus inhomogène par rapport aux autres. Dans la période mars-juillet, quatre générations ont été signalées dans le champ de Montelibretti (Figure 4), avec des pics respectivement le 25 avril, le 11 mai, le 11 juin et le 28 juin, tandis que les populations expérimentales ont signalé la même chose les 25 avril, 9 mai, 13 juin et 27 juin.



**Figure 3.** Comparaison entre simulé et surveillé *D. suzukii* populations, croissance, période de 2018. Les indicateurs triangulaires représentent les données des pièges, tandis que les croix indiquent les simulations.

ailé saison 2018.



**Figure 4.** Comparaison entre simulé et surveillé *D. suzukii* populations, saison de croissance 2019. Les indicateurs triangulaires représentent les données des pièges, tandis que les croix indiquent les simulations.

Dans le champ de Monterotondo (Figure 4), trois générations ont été signalées, avec des pics simulés les 27 avril, 12 juin et 4 juillet, respectivement, tandis que les données expérimentales ont signalé la même chose les 25 avril, 13 juin et 4 juillet.

Même dans ce cas, la capacité des simulations à capturer les points expérimentaux a été confirmée par le  $\chi^2$  et  $R^2$  valeurs répertoriées dans le tableau 3. En particulier, le niveau de fiabilité le plus élevé a été signalé dans le champ de Montelibretti.

#### 4. Discussion

Les résultats démontrent la bonne réponse des simulations dans la représentation des populations expérimentales de *Drosophila suzukii* sur des variétés mixtes de cerises cultivées dans le centre de l'Italie. Considérant la  $R^2$  répertoriée dans le tableau 3, toutes les valeurs de l'enquête triennale étaient supérieures à 0,9 sauf un cas qui était proche de 0,8. Ainsi, l'analyse des informations fournies par  $R^2$ , il est possible d'évaluer que le modèle (1) a une bonne fiabilité dans la description de la tendance des données expérimentales. Ce résultat est également supporté par le  $\chi^2$  valeurs, même si quelques précisions à ce sujet sont nécessaires. Un  $\chi^2$  élevé La valeur n'implique pas toujours une fiabilité moindre de la simulation, car elle dépend également de l'abondance des populations expérimentales et simulées. Par conséquent, même de petites différences entre des valeurs élevées peuvent fournir un  $\chi^2$  plus élevé [28]. Ce fut le cas en 2019 dans le champ de Montelibretti, où la densité de population la plus élevée parmi les trois années d'enquête a été observée, et le correspondant  $R^2$  indique que la tendance de la simulation a été bien décrite.

À la lumière des résultats obtenus dans la présente étude, l'équation (1) peut être un candidat valable à inclure dans un outil de système d'aide à la décision, même si, à ce jour, elle n'a été validée que dans deux domaines en Italie centrale. Dans le même temps, il est possible de souligner que le suivi de terrain reste fondamental pour piloter efficacement le modèle. En fait, l'un des problèmes les plus courants dans la modélisation des populations de ravageurs consiste à définir les conditions initiales, à savoir le moment où les œufs de la première génération annuelle sont pondus. Ce problème a été contourné par un suivi des adultes hivernants, qui reprennent leur activité au printemps. Ainsi, la valeur des premiers adultes capturés par les pièges peut fonctionner à la fois comme un temps zéro pour la simulation et comme une estimation grossière d'un coefficient de normalisation pour chaque génération. Cependant, [49,50]. Ainsi, dans ce cas, un suivi sur les femelles SWD pourrait améliorer la fiabilité des simulations, en tenant compte du fait qu'il s'agit d'un moment important dans l'IPM [51]. D'autre part, l'avantage d'une identification plus facile des mâles SWD est perdu, nécessitant ainsi un personnel plus qualifié et une instrumentation adéquate.

D'autres informations biologiques importantes peuvent être récupérées par les fonctions de taux de développement (3)–(5). En fait, la *a priori* analyse élu le Brière comme la meilleure représentation des tables de mortalité de Tochen et al. [12], mais les autres expressions peuvent également fournir des conseils utiles pour une gestion efficace des *D. suzukii* épidémies. Par exemple, la connaissance de la température optimale pour le développement du SWD peut être utile pour individualiser une variété de cerises avec une maturation déphasée par rapport au pic de population saisonnier du SWD. En prenant comme exemple les champs expérimentaux considérés dans ce travail, il est possible d'évaluer que les variétés précoces de printemps devraient être moins sensibles aux *D. suzukii* infestations, en raison des conditions de température moins favorables au développement de l'espèce [12]. De plus, les valeurs de température optimales ont été calculées avec précision, améliorant les données d'information déjà discutées par Ioratti et al. [7].

Même s'il existe certaines divergences entre les fonctions de taux de Logan et de Sharpe et De Michele dans la représentation des tables de mortalité de Tochen et al. [12], les valeurs de température optimales calculées sont en accord les unes avec les autres, et avec la même valeur calculée sur le Brière concernant. De plus, les erreurs types associées aux fonctions de taux de développement sont relativement faibles pour le Brière et Logan, mais plus élevées dans le cas de Sharpe et De Michele. La raison de cet écart est liée au nombre de paramètres de la fonction à estimer par rapport au nombre de points dans les tables de mortalité. Six paramètres pour la fonction de taux de développement de Sharpe et De Michele rendent inévitable une non linéaire

régression à un seul degré de liberté, trop faible pour considérer ce résultat comme fiable. Dès lors, même si le *a priori* Si l'analyse avait choisi la fonction de taux de Sharpe et De Michele comme meilleure représentation des points des tables de mortalité, le nombre de degrés de liberté aurait été trop faible pour considérer ce résultat comme fiable et l'utiliser pour des simulations.

De plus, l'approche de modélisation décrite dans cette étude peut être utile pour conduire des stratégies de contrôle alternatives basées, par exemple, sur la libération des ennemis naturels de l'espèce.

Wang et al. [17] ont évalué les performances thermiques de deux parasitoïdes potentiels de *D. suzukii* pupes, *Pachycrepoideus vindemiae* (Rondani) (Hyménoptères : Pteromalidae) et *Trichopria drosophila* (Perkins) (Hyménoptères : Diapriidae). Par conséquent, la disponibilité des tables de mortalité des ennemis naturels SWD permet l'application de l'équation (1) de la même manière que pour *D. suzukii*. Ainsi, une double simulation de l'insecte ravageur et de son parasitoïde/prédateur peut aider les agriculteurs et les techniciens à améliorer l'activité parasitaire/prédateur.

## 5. Conclusions

En conclusion, une dernière réflexion s'impose à la lumière des résultats de cette étude. Les hypothèses pour les applications de l'équation (1), à savoir l'utilisation des paramètres de la population féminine pour simuler les populations masculines, peuvent sembler à première vue peu opportunes, mais les résultats de cette étude montrent qu'en conditions de plein champ, il n'y a pas de différences dans la simulation. Les femelles SWD représentent la population masculine. Ce résultat est important car l'application du modèle nécessite la détection précoce de *D. suzukii* adultes pour estimer le temps zéro de la ponte ; attirer l'attention uniquement sur les hommes réduit la possibilité de confusion avec d'autres *Drosophila* espèces.

Au-delà des résultats prometteurs de cette étude, un effort considérable est encore nécessaire pour améliorer la fiabilité du modèle. Par exemple, la validation du modèle devrait être étendue à d'autres zones présentant des caractéristiques environnementales différentes : en effet, il se pourrait que lorsque les conditions changent, le sex-ratio de 1:1 ne soit plus valable [52]. Dans ce cas, une simple modification du modèle est nécessaire pour décrire mathématiquement les populations SWD sous différentes proportions de sexe. De plus, le modèle a été validé dans des champs gérés en régime biologique, par conséquent les effets des pratiques conventionnelles de lutte antiparasitaire n'ont pas été pris en compte.

Les travaux futurs devraient porter sur le développement d'un modèle décrivant l'effet des pratiques de lutte antiparasitaire sur la densité de population du DAT, la diapause hivernale, l'humidité relative sur le développement du DAT, ainsi que l'effet du vieillissement ou de la photopériode. Il s'agit donc d'un point de départ productif, à partir duquel d'autres améliorations peuvent être apportées.

**Les contributions de l'auteur:** Conceptualisation, LR et SS ; méthodologie, LR; FG, MA et MC ; logiciel, LR ; validation, MA et LR ; analyse formelle, LR et MC ; enquête, MA; ressources, SS ; conservation des données, LR ; rédaction—préparation du brouillon original, LR, MC, FG ; rédaction—révision et édition, LR, MC; visualisation, LR, MC ; surveillance, SS ; administration du projet, SS et MC ; financement acquisition, SS Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

**Le financement:** Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

**Remerciements :** Les auteurs remercient les relecteurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions, qui ont été d'une grande utilité pour l'amélioration de ce manuscrit. Les auteurs remercient *OpLatium* pour l'aimable concession des données utilisées pour poursuivre l'objectif de cette étude. La recherche a été réalisée dans le cadre de l'initiative du MIUR (Ministère de l'Éducation, de l'Université et de la Recherche) « Département d'excellence » (loi 232/2016).

**Les conflits d'intérêts:** Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

## Références

1. Kanzawa, T. Études sur *Drosophila suzukii* Mats. Dans *Revue d'entomologie appliquée*, Wiley : Hoboken, NJ, États-Unis, 1939 ; Disponible en ligne: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19410501073> (consulté le 11 octobre 2020).
2. Base de données mondiale de l'OEPP. Disponible en ligne: <https://gd.eppo.int/taxon/> (consulté le 11 octobre 2020).

3. Hauser, M. Un récit historique de l'invasion de *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptères : Drosophilidae) dans la zone continentale des États-Unis, avec des remarques sur leur identification. *Gestion des nuisibles Sci.* **2011**, *67*, 1352–1357. [[RéfCroisée](#)] [[PubMed](#)]
4. Calabre, G.; Munca, J.; Bachli, G.; Serra, L.; Pascual, M. Premiers enregistrements des espèces nuisibles potentielles *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) en Europe. *J. Appl. Entomol.* **2012**, *136*, 139–147. [[RéfCroisée](#)]
5. Cini, A.; Ioriatti, C.; Anfora, G. Un examen de l'invasion de *Drosophila suzukii* en Europe et un projet de programme de recherche pour la lutte intégrée contre les ravageurs. *Taureau. Insectol.* **2012**, *65*, 149–160.
6. Grassi, A.; Giongo, L.; Palmieri, L.; Giongo, L.; Palmieri, L. *Drosophila (Sophophora) suzukii* (Matsumura) (Diptera : Drosophilidae), nouveau ravageur des fruits rouges dans le Trentin (Italie du Nord) et en Europe. *OILBI Taureau WPRS.* **2011**, *70*, 121–128.
7. Ioratti, C.; Frontuto, A.; Grassi, A.; Anfora, G.; Simoni, S. *Drosophila suzukii*, (Matsumura), una Nuova Specie Invasiva Dannosa Alle Colture di Piccoli Frutti; Un'emergenza fitosanitaria per la fragola e la frutticoltura montana : *Drosophila suzukii* : Florence, Italie, 2011 ; Volume 8, p. 69–80.
8. Bolda, député ; Goodhue, RE; Zalom, FG *Drosophila* à ailes tachetées : impact économique potentiel d'un ravageur nouvellement établi. *Agric. Resour. Écon. Mise à jour* **2010**, *13*, 5–8.
9. 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 mous en cours de maturation, élargissant son aire de répartition géographique et son potentiel de dégâts. *J. Intégr. Gestion des nuisibles* **2011**, *2*, G1–G7. [[RéfCroisée](#)]
10. Tait, G.; Grassi, A.; Pfab, F.; Crava, CM ; Dalton, DT ; Magarey, R.; Ometto, L.; Vezzulli, S.; Rossi-Stacconi, MV ; Gottardello, A.; et coll. Dynamique spatiale à grande échelle *Drosophila suzukii* dans le Trentin, en Italie. *J. Pest Sei.* **2018**, *91*, 1213–1224. [[RéfCroisée](#)]
11. Lee, JC; Wang, X.; Daane, KM ; Hoelmer, KA; Isaacs, R.; Sial, AA; Walton, VM Contrôle biologique de la drosophile à ailes tachetées (Diptères : Drosophilidae)—Tactiques actuelles et en attente. *J. Intégr. Gestion des nuisibles* **2019**, *dix*. [[RéfCroisée](#)]
12. Tochen, S.; Dalton, DT ; Wiman, N.; Hamm, C.; Shearer, PG ; Walton, VM Développement lié à la température et paramètres de population pour *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) sur cerisier et myrtille. *Environ. Entomol.* **2014**, *43*, 501–510. [[RéfCroisée](#)]
13. Ryan, GD ; Emiljanowicz, L.; Wilkinson, F.; Kornya, M.; Newman, JA Tolérances thermiques de la drosophile à ailes tachetées *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *J. Econ. Entomol.* **2016**, *109*, 746–752. [[RéfCroisée](#)]
14. Eben, A.; Reifenrath, M.; Briem, F.; rose, S.; Vogt, H. Réponse de *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) à la chaleur et à la sécheresse extrêmes. *Agric. Forêt Entomol.* **2018**, *20*, 113–121. [[RéfCroisée](#)]
15. Asplen, MK; Anfora, G.; Biondi, A.; Choi, D.-S.; Chu, D.; Daane, KM ; Gibert, P.; Gutierrez, AP ; Hoelmer, KA; Hutchison, WD ; et coll. Biologie de l'invasion de la drosophile à ailes tachetées (*Drosophila suzukii*): Une perspective globale et des priorités futures. *J. Pest Sei.* **2015**, *88*, 469–494. [[RéfCroisée](#)]
16. Cuthbertson, A.; Blackburn, L.; Audsley, N. Efficacité des prédateurs invertébrés disponibles dans le commerce contre *Drosophila suzukii*. *Insectes* **2014**, *5*, 952–960. [[RéfCroisée](#)] [[PubMed](#)]
17. Wang, X.-G. ; Serrato, MA; Fils, Y. ; Walton, VM; Hogg, BN; Daane, KM Performance thermique de deux parasitoïdes pupes indigènes attaquant l'envahissant *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *Environ. Entomol.* **2018**, *47*, 764–772. [[RéfCroisée](#)]
18. Gabarra, R. ; Riudavets, J.; Rodríguez, GA ; Pujade-Villar, J. ; Arnó, J. Perspectives de la lutte biologique contre *Drosophila suzukii*. *BioContrôle* **2015**, *60*, 331–339. [[RéfCroisée](#)]
19. Hiebert, N.; Carrau, T.; Bartling, M.; Vilcinskas, A.; Lee, K. Identification des bactéries entomopathogènes associées au ravageur envahissant *Drosophila suzukii* dans les régions infestées d'Allemagne. *J. Invertebr. Pathol.* **2020**, *173*, 107389. [[RéfCroisée](#)]
20. Ibouh, K. ; Oreste, M.; Bubici, G.; Tarasco, E.; Rossi Stacconi, MV ; Ioriatti, C.; Verrastro, V.; Anfora, G.; Baser, N. Contrôle biologique de *Drosophila suzukii*. Efficacité des parasitoïdes, des champignons entomopathogènes, des nématodes et des agents dissuasifs de l'oviposition dans les essais en laboratoire. *Prot.* **2019**, *125*, 104897. [[RéfCroisée](#)]
21. Wang, X.-G. ; Stewart, TJ; Biondi, A.; Chávez, BA; Ingels, C.; Caprile, J.; Accordez, JA; Walton, VM; Daane, KM Dynamique des populations et écologie de *Drosophila suzukii* en Californie centrale. *J. Pest Sei.* **2016**, *89*, 701–712. [[RéfCroisée](#)]
22. Santoiemma, G. ; Tonina, L.; Marini, L.; Duso, C.; Mori, N. Gestion intégrée des *Drosophila suzukii* dans les vergers de cerises douces. *Entomologie générale* **2020**, *40*, 297–305. [[RéfCroisée](#)]

23. Coop, L. *Modèle de phénologie en ligne et de degrés-jours pour l'agriculture et la prise de décision aux États-Unis*; Centre Intégré de Protection des Végétaux, Dép. Botanique & Pathologie Végétale Université d'État de l'Oregon : Corvallis, OR, États-Unis, 2010 ; Disponible en ligne: <http://uspest.org/risk/models?ssp=swd> (consulté le 11 octobre 2020).
24. Damus, M. *Quelques résultats préliminaires de la modélisation de la distribution Climex et Maxent de Drosophila suzukii, version 2*; Évaluation des risques phytosanitaires de l'ACIA : Ottawa, ON, Canada, 2009.
25. Rossini, L. ; Severini, M.; Contarini, M.; Speranza, S. Une nouvelle approche de modélisation pour décrire un cycle de vie d'insecte vis-un-vis-à-vis de la protection des végétaux : Description et application dans l'étude de cas de *Tuta absoluta*. *Écol. Modèle*. **2019**, *409*, 108778. [RéfCroisée]
26. Rossini, L. ; Severini, M.; Contarini, M.; Speranza, S. *EntoSimName*, un simulateur basé sur ROOT pour prévoir le cycle de vie des insectes : Description et application dans le cas de *Lobesia botrana*. *Prot.* **2020**, *129*, 105024. [RéfCroisée]
27. Emiljanowicz, LM ; Ryan, GD ; Langille, A.; Newman, J. Développement, rendement reproducteur et croissance démographique de la mouche des fruits *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) sous régime artificiel. *J. Econ. Entomol.* **2014**, *107*, 1392–1398. [RéfCroisée] [PubMed]
28. Rossini, L. ; Contarini, M.; Severini, M.; Talano, D.; Speranza, S. Une approche de modélisation pour décrire la *Anthonomus eugenii* (Coleoptera : Curculionidae) cycle de vie en protection des végétaux : *A priori et a posteriori* une analyse. *Fla. Entomol.* **2020**, *103*, 259–263. [RéfCroisée]
29. Rossini, L. ; Severini, M.; Contarini, M.; Speranza, S. Utilisation de ROOT pour construire un logiciel optimisé pour l'estimation des paramètres et les simulations avec Distributed Delay Model. *Écol. Informer.* **2019**, *50*, 184–190. [RéfCroisée]
30. Rossini, L. ; Speranza, S.; Contarini, M. Distributed Delay Model et l'équation de Von Foerster : différents points de vue pour décrire les cycles de vie des insectes avec l'âge chronologique et le temps physiologique. *Écol. Informer.* **2020**, *59*, 101117. [RéfCroisée]
31. Rossini, L. ; Contarini, M.; Severini, M.; Speranza, S. Reformulation du modèle de retard distribué pour décrire les populations d'insectes nuisibles à l'aide de variables de comptage. *Écol. Modèle*. **2020**, *436*, 109286. [RéfCroisée]
32. Rossini, L. ; Contarini, M.; Speranza, S. Une nouvelle version de l'équation de Von Foerster pour décrire les organismes poikilothermiques, y compris l'âge physiologique et le taux de reproduction. *Ric. Tapis.* **2020**. [RéfCroisée]
33. Cern RACINE Page Web du Cern. Disponible en ligne: <http://root.cern.ch> (consulté le 30 octobre 2020).
34. Brun, R. ; Rademakers, F. ROOT—Un cadre d'analyse de données orienté objet. *Nucl. Instrument. Méthodes Phys. Rés. Secte. Un Accél. Les spectromètres détectent. Assoc. Équiper.* **1997**, *389*, 81–86. [RéfCroisée]
35. Ikemoto, T. ; Kiritani, K. Nouvelle méthode de spécification des températures de seuil basses et élevées à l'aide du modèle thermodynamique SSI du développement des insectes. *Environ. Entomol.* **2019**, *48*, 479–488. [RéfCroisée]
36. Mirhosseini, MA ; Fathipour, Y.; Reddy, GVP Réponse du développement des arthropodes à la température : une revue et un nouveau logiciel de modélisation. *Anne. Entomol. Soc. Un m.* **2017**, *110*, 507–520. [RéfCroisée]
37. Damos, P. ; Savopoulou-Soultani, M. Modèles pilotés par la température pour le développement des insectes et les besoins thermiques vitaux. *Psyché* **2012**, *2012*. [RéfCroisée]
38. Severini, M. ; Gilioli, G. Storia e filosofia dei modelli di simulazione nella difesa delle colture agrarie. *Pas. Sylla Prot. Delle Piante* **2002**, *15*, 9–29.
39. Brière, J.-F. ; Pracros, P.; Le Roux, A.-Y.; Pierre, J.-S. Un nouveau modèle de taux de développement dépendant de la température pour les arthropodes. *Environ. Entomol.* **1999**, *28*, 22–29. [RéfCroisée]
40. Logan, JA ; Wolkind, DJ ; Hoyt, SC; Tanigoshi, LK Un modèle analytique pour la description des phénomènes de vitesse dépendant de la température chez les arthropodes. *Environ. Entomol.* **1976**, *5*, 1133–1140. [RéfCroisée]
41. Sharpe, PJH ; DeMichele, DW Cinétique de réaction du développement de poikilotherme. *J. Théor. Biol.* **1977**, *64*, 649–670. [RéfCroisée]
42. Champ d'école, RM; Sharpe, PJH ; Magnuson, CE Régression non linéaire des modèles de vitesse biologiques dépendant de la température basés sur la théorie de la vitesse de réaction absolue. *J. Théor. Biol.* **1981**, *88*, 719–731. [RéfCroisée]
43. Wagner, TL ; Wu, H.-I.; Sharpe, PJH ; Coulson, RN Modélisation des distributions du temps de développement des insectes : revue de la littérature et application de la fonction de weibull. *Anne. Entomol. Soc. Un m.* **1984**, *77*, 475–483. [RéfCroisée]
44. Harcourt, DG Développement et utilisation des tables de mortalité dans l'étude des populations naturelles d'insectes. *Annu. Rév. Entomol.* **1969**, *14*, 175. [RéfCroisée]
45. Brun, R. ; Rademakers, Guide de l'utilisateur F. ROOT. Disponible en ligne: <https://root.cern.ch/guides/users-guide> (consulté le 30 octobre 2020).

46. Dalton, D.T.; Walton, V.M.; Shearer, P.G.; Walsh, D.B.; Caprile, J.; Isaacs, R. Survie en laboratoire de *Drosophila suzukii* dans des conditions hivernales simulées du nord-ouest du Pacifique et du piégeage saisonnier sur le terrain dans cinq régions principales de production de petits fruits et de fruits à noyau aux États-Unis. *Gestion des nuisibles Sci.* **2011**, *67*, 1368–1374. [RéfCroisée]
47. Kinjo, H.; Kunimi, Y.; Nakai, M. Effets de la température sur la reproduction et le développement des *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae). *Appl. Entomol. Zool.* **2014**, *49*, 297–304. [RéfCroisée]
48. Bieri, M.; Baumgärtner, J.; Bianchi, G.; Delucchi, V.; Arx, R. Développement et fécondité du puceron du pois (*Acyrthosiphon pisum* Harris) affectée par les températures constantes et par les variétés de pois. *Gant. Suisse. Entomol. Ges.* **1983**, *56*, 163–171.
49. Revadi, S.; Lebreton, S.; Witzgall, P.; Anfora, G.; Dekker, T.; Becher, P. Comportement sexuel de *Drosophila suzukii*. *Insectes* **2015**, *6*, 183–196. [RéfCroisée] [PubMed]
50. Zhai, Y.; Lin, Q.; Zhang, J.; Zhang, F.; Zheng, L.; Yu, Y. Diapause reproductive adulte dans *Drosophila suzukii* femelles. *J. Pest Sci.* **2016**, *89*, 679–688. [RéfCroisée]
51. Panneau, A.; Zeeman, L.; Van der Sluis, B.; Van Elk, P.; Pannebakker, B.; Wertheim, B.; Helsen, H. Hiverné *Drosophila suzukii* sont la principale source d'infestation des premières cultures fruitières de la saison. *Insectes* **2018**, *9*, 145. [RéfCroisée]
52. Bois de chardon, H.M.A.; Gill, P.; Bières, E.H.; Shearer, P.G.; Walsh, D.B.; Rozema, B.M.; Acheampong, S.; Castagnoli, S.; Ouais, W.L.; Smytheman, P.; et coll. Analyse spatiale de la dynamique saisonnière et de l'hivernage des *Drosophila suzukii* (Diptères : Drosophilidae) dans le bassin Okanagan-Columbia, 2010-2014. *Environ. Entomol.* **2018**, *47*, 221–232. [RéfCroisée]

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



©2020 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) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).