

Consultez les discussions, les statistiques et les profils des auteurs de cette publication à l'adresse suivante : <https://www.researchgate.net/publication/356085393>.

L'analyse globale de l'abondance saisonnière du ravageur envahissant *Drosophila suzukii* révèle que les extrêmes de température déterminent le potentiel d'activité de la population

Article dans Pest Management Science - Juin 2021

DOI : 10.1002/ps.6494

CITATION

1

LECTURES

71

4 auteurs :



Michael Ørsted

Université d'Aarhus

16 PUBLICATIONS 185 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)



Jessica C Lye

Citrus Australie

14 PUBLICATIONS 213 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)



Paul Umina

Université de Melbourne

133 PUBLICATIONS 1 800 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)



James Maino

Cesar Australie

43 PUBLICATIONS 417 CITATIONS

[VOIR LE PROFIL](#)

Certains des auteurs de cette publication travaillent également sur ces projets connexes :



Drosophile à ailes tachetées [Voir le projet](#)



Gestion de la résistance aux insecticides dans les RLEM et sensibilité chimique d'autres ravageurs des céréales [Voir le projet](#)

Tout le contenu de cette page a été téléchargé par [Michael Ørsted](#) le 10 novembre 2021.

L'utilisateur a demandé l'amélioration du fichier téléchargé.

L'analyse globale de l'abondance saisonnière du ravageur envahissant *Drosophila suzukii* révèle que les extrêmes de température déterminent le potentiel d'activité de la population

Michael Ørsted,^{a*}  Jessica Lye,^b Paul A Umina^{b,c}  et James L Maino^b



Résumé

CONTEXTE : La drosophile ailée tachetée (*Drosophila suzukii*), ravageur mondial, continue d'avoir un impact économique significatif sur la production fruitière dans les zones où elle est établie, en plus des aires nouvellement envahies. Les activités de gestion allant des réponses nationales en matière de biosécurité à la lutte contre le ravageur à l'échelle de l'exploitation sont limitées par l'incapacité à prévoir le moment et la gravité des épidémies maritimes de *D. suzukii* et ses facteurs climatiques.

RÉSULTATS : Ici, nous avons compilé et analysé les données sur les abondances saisonnières internationales de *D. suzukii* sous différents climats, types de cultures et contextes de gestion afin d'améliorer la prévisibilité de la dynamique saisonnière des populations. En reliant les abondances saisonnières aux prédicteurs environnementaux, spécifiquement la température, nous avons trouvé de forts effets négatifs de l'exposition à des températures élevées et basses au cours du mois précédent. Contrairement à la plupart des études régionales sur la phénologie de *D. suzukii* qui se concentrent sur la température dans la plage de développement physiologique, nous montrons que les extrêmes thermiques expliquent mieux les fluctuations saisonnières de la population.

CONCLUSION : Bien que les captures par piège restent une mesure indirecte des infestations et doivent être interprétées avec précaution en termes de risque pour les cultures, nos résultats devraient soutenir les programmes de surveillance grâce à une meilleure connaissance des facteurs climatiques qui influencent

l'activité de la population de *D. suzukii*. L'impact négatif des températures élevées suggère que les stratégies de gestion de fin de saison axées sur la manipulation des microclimats des cultures à des températures supérieures à 25 °C peuvent réduire l'abondance de *D. suzukii*. Nous montrons que l'abondance en début de saison est modulée par le climat, en particulier par la profondeur des extrêmes de froid subis dans l'intervalle de temps précédent. Ces associations peuvent être développées en prévisions de risques pour les cultures en début de saison afin de soutenir les programmes de surveillance.

© 2021 Société de l'industrie chimique.

Des informations complémentaires sont disponibles dans la version en ligne de cet article.

Mots clés : drosophile à ailes tachetées ; abondance saisonnière ; captures par piège ; dynamique de la population ; degrés-jours ; *Drosophila suzukii* ; méta-analyse ; revue.

1 INTRODUCTION

La drosophile à ailes tachetées (SWD ; *Drosophila suzukii*), hautement invasive, est apparue comme un grave ravageur de **significanc internationale** pour la production fruitière mondiale, **pondant des œufs dans les fruits en cours de maturation de plus** de 145 espèces végétales,¹ y compris les fruits à noyau et les **baies d'importance économique**. SWD a été **first détecté** en Europe et en Amérique du Nord en 2008,^{2,3} et depuis 2012, il a également été constaté qu'il était répandu en Amérique du Sud.⁴ Plus récemment, *D. suzukii* a été détecté sur le continent africain.^{5,6} Les pertes annuelles estimées dues à *D. suzukii* ont dépassé 500 millions de dollars US dans seulement trois États des États-Unis,⁷ et en Europe, il a été démontré que *D. suzukii* infeste jusqu'à 80 % des fruits dans certains **fields**.⁸

Un outil important dans les stratégies de gestion intégrée des

nuisibles est l'utilisation de modèles qui prédisent la distribution spatiale et temporelle des nuisibles. Récemment, les modèles de distribution des espèces ont mis en lumière la distribution géographique potentielle de *D. suzukii*, et ont permis d'identifier les points d'invasion probables et les zones de haute aptitude nécessitant des efforts de surveillance supplémentaires.^{9–12} Cependant, lorsqu'un organisme nuisible est déjà bien établi, l'attention doit plutôt se porter sur les points suivants

sur la tentative de comprendre les modèles temporels de la dynamique des populations pour améliorer la gestion des ravageurs. Pour répondre aux priorités de gestion relatives à *D. sukii*, qui est maintenant répandu dans de nombreuses parties du globe, des **recherches régionalement spécifiques se sont accumulées** sur la biologie des populations de *D. sukii*.^{13–22} Ces études mettent souvent en relation les captures par piège tout au long de l'année avec les conditions environnementales, principalement la **température, afin de refléter comment le climat local affecte les fluctuations** de l'abondance saisonnière.

* Correspondance à : M Ørsted, Zoophysiology, Département de biologie, Université d'Aarhus, C.F. Møllers Allé 3, 8000 Aarhus C, Danemark.
Courriel : moer@bio.aau.dk

a Zoophysiology, Département de biologie, Université d'Aarhus, Aarhus C, Danemark

b Cesar Australia, Parkville, Australie

c École de biosciences, Université de Melbourne, Parkville, Australie.

Les fluctuations saisonnières des captures par piège varient largement selon les régions géographiques et les climats, les stratégies de gestion des cultures (par exemple, le piégeage et les applications de pesticides) et la proximité de plantes hôtes non cultivées (par exemple, les plantes hôtes sauvages et cultivées limitrophes). Malgré le nombre croissant d'études locales sur l'écologie des populations de *D. suzukii*, il n'y a pas eu jusqu'à présent de tentative de synthèse de ces données régionales pour comprendre les schémas plus larges à travers les divers climats, produits et contextes de gestion dans lesquels on trouve actuellement *D. suzukii*. Cela représente une opportunité pour une étude macro-écologique sur les processus généraux qui sous-tendent la dynamique saisonnière de la population de *D. suzukii* dans les contextes locaux. Une meilleure prédictibilité de ces dynamiques peut améliorer la gestion en cours dans les zones de production actuellement affectées par la maladie.

D. suzukii par des efforts de surveillance ciblés et l'application de stratégies proactives de gestion des ravageurs. Pour les pays qui se préparent à d'éventuelles incursions, comme l'Australie et la Nouvelle-Zélande, une meilleure prévisibilité permettra de mieux comprendre le comportement maritime probable des populations d'organismes nuisibles dans différents contextes de production (par exemple, le type de culture et les pratiques de gestion), ce qui améliorera les capacités de lutte contre les organismes nuisibles, la préparation à la biosécurité et les réponses aux incursions.

Ici, nous compilons les données sur les abondances saisonnières internationales de

D. suzukii pour différents climats, cultures et contextes de gestion couvrant les principales zones géographiques d'occurrence des espèces indigènes et envahissantes. Cela nous a permis d'étudier à l'adresse comment les variations climatiques et les facteurs de gestion expliquent la variation de l'abondance saisonnière de *D. suzukii* au fil du temps. Il est particulièrement intéressant de savoir comment des températures potentiellement stressantes, en dehors de l'optimum de l'espèce, affectent à la fois le début de l'émergence et le pic d'abondance de *D. suzukii*. Localement, il a été suggéré, par exemple, que les conditions hivernales froides provoquent une forte mortalité conduisant à une population printanière réduite ou absente, et par la suite à une accumulation plus lente d'individus pendant la saison de croissance suivante.^{13,23} De même, on a constaté que les captures dans les pièges diminuent lorsque les températures sont élevées pendant l'été ou pendant des périodes chaudes prolongées, comme les canicules.^{17,22,24} Nous ne savons toutefois pas si ces tendances sont générales et si des facteurs climatiques ou des facteurs de gestion peuvent expliquer les écarts saisonniers à grande échelle.

2 MÉTHODES

2.1 Données sur l'abondance saisonnière et la

distribution géographique L'abondance ont été compilées à partir d'un examen des études *field* de l'industrie de la pêche.

D. suzukii dans lesquelles les abondances saisonnières ont été mesurées par des captures de pièges, couvrant les principales zones géographiques des occurrences indigènes et invasives. Les données ont été compilées à partir de tableaux sources ou, pour chaque étude, nous avons disposés les extraits de figures sur lesquelles les pièges, le nombre de *D. suzukii* dans les pièges et le nombre de *D. suzukii* dans les pièges. méthode de ping, date d'inspection, période de piégeage, emplacement du piège, année de la first détection régionale et principale plante cultivée contrôlée. Pour placer ces études dans le contexte de l'étendue mondiale actuelle de *D. suzukii*, nous

Il en résulte que plus de 80 % des études compilées disposent de données provenant de stations météorologiques situées dans un rayon de 30 km du site d'étude.

Pour mieux interpréter les tendances saisonnières de l'abondance à travers une gamme de méthodes de piégeage, de conditions de culture et de contextes de gestion, les données de comptage des pièges ont été mises à l'échelle par le nombre maximum d'individus observés pour chaque étude, culture ou méthode de piégeage unique. Il a été noté précédemment que les données des pièges pour

D. suzukii ne représentent pas nécessairement les pressions sur le *field*,^{22,23} donc la mise à l'échelle par le nombre maximum de pièges observés sert également à minimiser l'inférence sur les comptes absolus en mettant davantage l'accent sur les changements relatifs au cours d'une saison.

Les covariables environnementales de chaque point de surveillance ont été calculées à partir des données climatiques, y compris la température moyenne des 30 jours précédents, ainsi que le cumul des degrés-jours (DD) inférieurs à 5 °C et supérieurs à 25 °C. Ces seuils de température représentent approximativement les limites inférieures de température du développement et la phase décroissante du taux de croissance de la population, respectivement.^{27,28} Ces seuils de température représentent approximativement les limites inférieures de température du développement et la phase décroissante du taux de croissance de la population, respectivement.⁹ Pour calculer ces covariations, les températures quotidiennes minimales et maximales disponibles ont été converties en températures horaires à l'aide d'une courbe de température quotidienne idéalisée qui utilise une courbe sinusoidale pour le réchauffement diurne et une fonction de décroissance logarithmique pour le refroidissement nocturne, à l'aide du progiciel R 'chillR'.²⁹

2.3 Analyse statistique

Pour analyser les tendances saisonnières de l'abondance des pièges de *D. suzukii*, nous avons utilisé des modèles mixtes additifs généralisés (GAMM). Un GAMM relâche l'hypothèse plus restrictive des modèles additifs généralisés selon laquelle les données sont indépendantes, ce qui est peu probable dans de nombreux contextes écologiques lorsque des observations répétées ont été faites sur les abondances au fil du temps.^{30–32} Un GAMM (famille = quasibinomiale) a été utilisé pour examiner l'abondance saisonnière échelonnée (0-1) par rapport aux covariables pour la saisonnalité, les conditions climatiques, la culture hôte et la méthode de piégeage. ~~Spécifiquement~~ l'abondance échelonnée ($y_{i|a|b}$) pour le site i avec la culture a et la méthode de piégeage b pourrait être représentée comme suit :

$$\text{logit } y_{i|a|b} = f_1(j) + f_2(\delta T_i) + f_3(D_{i|T < T_{\min}}) + f_4(D_{i|T > T_{\max}}) + \varepsilon_{i|a|b}$$

$$\varepsilon_{i|a|b} = N(0, \sigma_a^2)$$

$$\varepsilon_{i|b} = N(0, \sigma_b^2)$$

où $f_1(j)$ était une fonction de lissage (spline de régression cubique pénalisée)³³ des jours après le 1er janvier (ou le 1er juillet pour l'hémisphère nord) suivant l'année d'incursion (j) pour la i -ème observation. Les termes $f_2(\delta T_i)$, $f_3(D_{i|T < T_{\min}})$, et $f_4(D_{i|T > T_{\max}})$ ont été lissés.

avons cartographié l'aire de répartition approximative de *D. suzukii* en utilisant des ensembles de données précédemment publiées sur les occurrences de *D. suzukii*^{12,25} et des enregistrements récents.

2.2 Prédicteurs environnementaux

Pour construire les variables climatiques aux emplacements et à la période de l'étude, nous avons utilisé les données météorologiques GSOD (Global Surface Summary of the Day) des centres nationaux d'information sur l'environnement (NCEI) des États-Unis, qui ont été récupérées à l'aide du paquet R 'GSODR'.²⁶ Nous avons sélectionné les stations météorologiques en fonction de leur proximité avec chaque étude.

Les termes $\epsilon_{i,t,p}$ et $\epsilon_{i,t,p}$ correspondaient au terme des effets aléatoires de la culture principale et de la méthode de piégeage, respectivement. Les termes $\epsilon_{i,t,p}$ et $\epsilon_{i,t,p}$ correspondaient au terme des effets aléatoires de la culture principale et de la méthode de piégeage, respectivement. Pour tenir compte de l'autocorrélation, nous avons utilisé une structure de corrélation à moyenne mobile d'ordre $P = 2$, où l'ordre des observations spécifiait la covariable temporelle pour chaque étude.^{33,34}

3 RÉSULTATS

Nous avons passé en revue les études field publiées sur *D. suzukii* dans lesquelles les abondances sea-sonal ont été mesurées par des captures de pièges. A partir de 13 études et 117 emplacements uniques (Figure 1), cela a donné lieu à des observations pour 12 494 périodes de piégeage (médiane de piégeage

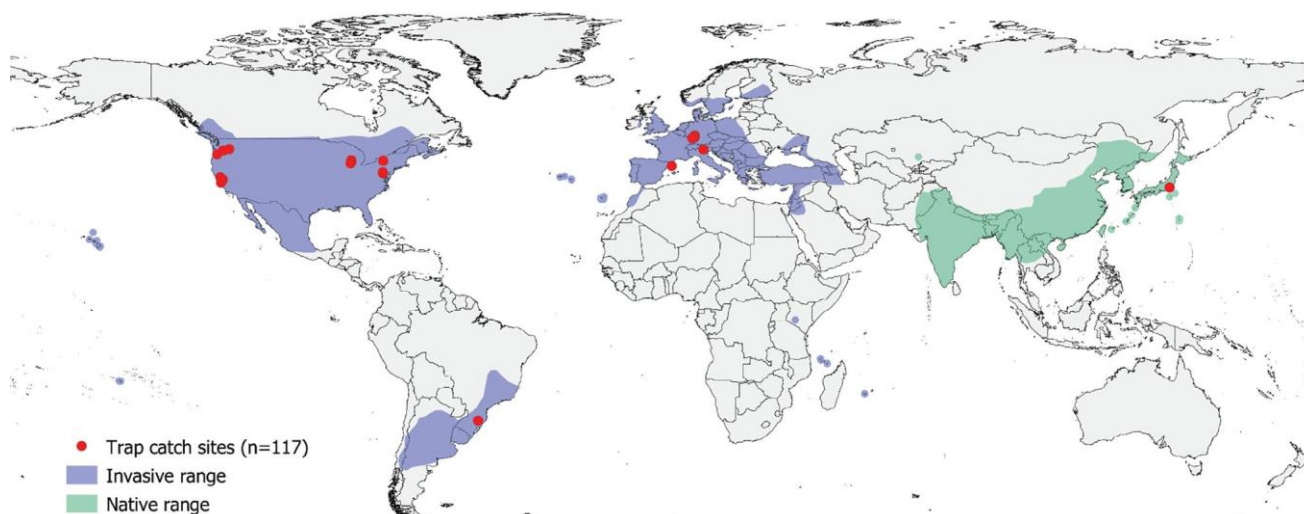


FIGURE 1. Localisation géographique des données d'abondance saisonnière et aire de répartition de *Drosophila suzukii*. Emplacements géographiques des données d'abondance

Données sur l'abondance saisonnière de *D. suzukii* (117 sites de capture de pièges : points rouges), et aire de répartition approximative, divisée en aire indigène (vert) et aire envahissante (bleu) à travers l'Europe, l'Amérique du Nord et du Sud, et l'Afrique. Les enregistrements insulaires et les occurrences continentales isolées loin d'une aire de répartition cohésive sont marqués d'un **1°** pour une meilleure visibilité. L'aire de répartition est approximée à l'aide d'ensembles de données publiées précédemment sur les occurrences de *D. suzukii*^{12,25} et de signalements récents.^{5,6,35}

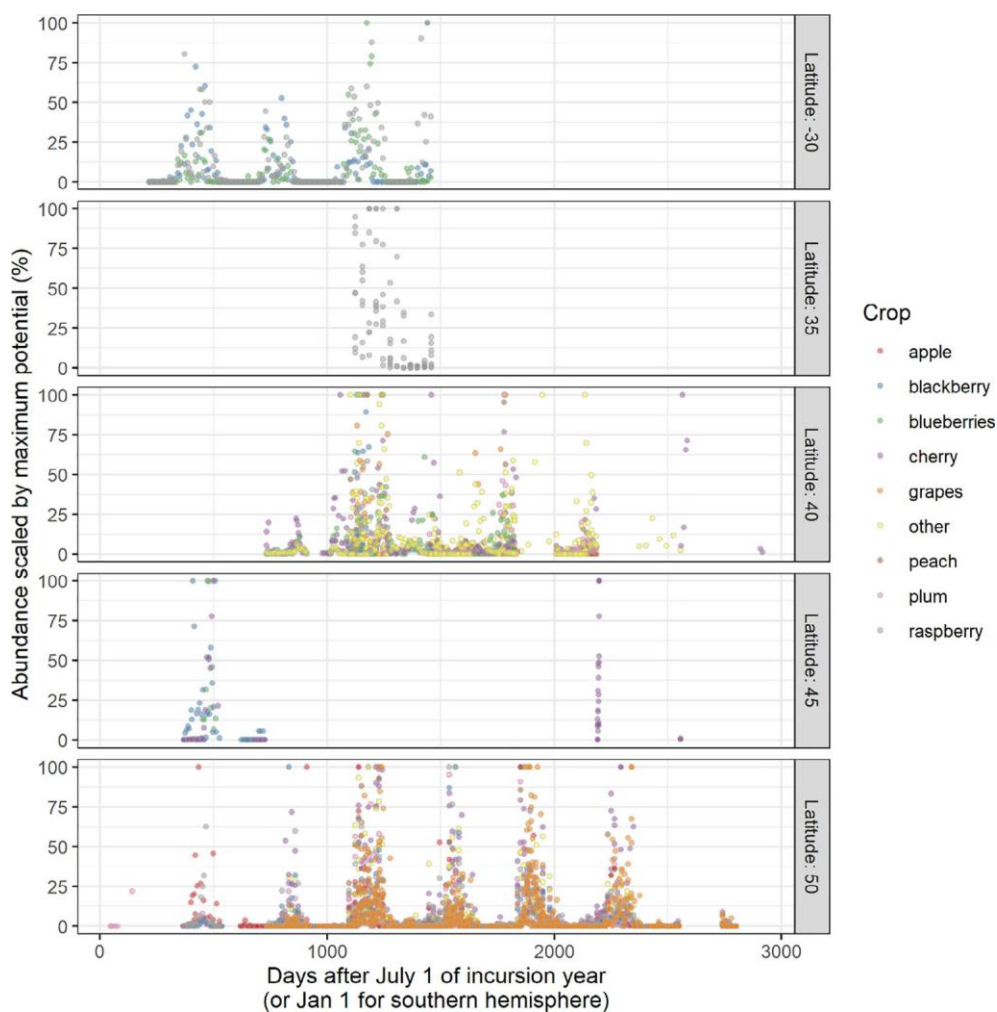


FIGURE 2. Saisonnalité de l'abondance de *Drosophila suzukii* selon les latitudes et les cultures. Données d'abondance des pièges incluses dans l'ensemble des données compilées pour les latitudes arrondies aux 5° les plus proches, de 30°S (Brésil) à 50°N (Allemagne). La culture dans laquelle le piège était situé est indiquée par la couleur du marqueur. Ici, les hôtes non cultivés ont été exclus et les hôtes représentant moins de 5% des entrées dans l'ensemble de données sont classés dans la catégorie "autres".

TABEAU 1. Coefficients paramétriques du modèle mixte additif général (GAMM) et signification approximative des fonctions de lissage des jours après le 1er janvier pour l'hémisphère sud (ou le 1er juillet pour l'hémisphère nord) suivant l'année d'incursion (jour), et paramètres relatifs aux 30 jours précédents d'une observation ; température moyenne (meanmonthlytemp), degrés-jours cumulés inférieurs à 5 °C (ddmin) et degrés-jours cumulés supérieurs à 25 °C (ddmax). La signification approximative du terme des effets aléatoires de la culture principale et de la méthode de piégeage est également indiquée.

		Estimation	SE	Valeur t	Valeur P	
Intercepter		-1.96	0.30	-6.43	1.34×10^{-10}	***
	k	edf	Ref.df	F	P	
s(jour)	12	9.98	9.98	81.72	2.16×10^{-16}	***
s(meanmonthlytemp)	5	1.00	1.00	3.07	0.0795	
s(ddmax)	5	3.59	3.59	24.46	7.01×10^{-18}	***
s(ddmin)	5	1.00	1.00	27.25	1.82×10^{-7}	***
s(culture principale)	-	10.09	20.00	3.15	8.81×10^{-7}	***
s(méthode de piégeage)	-	6.89	9.00	18.61	4.22×10^{-16}	***

edf, degrés de liberté effectifs ; Ref.df, degrés de liberté de référence ; F, statistique F. ***P < 0.001.

période = 12 jours ; gamme 1-48 jours) à travers 20 espèces hôtes (Tableau S1). Nous avons également cartographié la distribution géographique actuelle approximative qui s'étend sur 58 pays entre les latitudes 41,5°S et 63°N (Figure 1), y compris les premières occurrences signalées sur le continent africain,^{5,6} , ainsi que l'enregistrement le plus septentrional récemment découvert en Finlande.³⁵

Comme prévu, les données sur les captures par piège ont montré de fortes tendances saisonnières (Figure 2) sur pas moins de 7 années de données de piège dans certaines régions.²² Parmi les prédicteurs à effet fixé, jours après le 1er janvier dans l'hémisphère sud (ou le 1er juillet dans l'hémisphère nord) suivant l'année d'incursion était significatif ($F_{9,98} = 81,7$, $P < 0,001$; Tableau 1). Les graphiques de dépendance partielle montrant la réponse marginale de l'abondance mise à l'échelle indiquent un effet croissant du jour à partir d'environ le jour 250 jusqu'à environ le jour 150 (figure 3A) ; c'est-à-dire environ du début mars à la fin novembre dans l'hémisphère nord, et du début septembre à la fin mai dans l'hémisphère sud. Nous avons également observé une tendance de la température moyenne des 30 jours précédents à l'augmentation des captures de pièges, d'environ 15 à 25 °C (figure 3B), bien que cet effet ne soit pas significatif ($F_1 = 3,07$, $P = 0,0795$; tableau 1). Il est intéressant de noter que nous avons observé un effet négatif approximativement linéaire des DJ accumulées au-dessus de 25 °C au cours du mois précédent sur l'abondance à l'échelle (figure 3C), et un effet négatif linéaire similaire des DJ accumulées au-dessous de 5 °C au cours du mois précédent (figure 3D). Les deux termes de lissage étaient significativement négatifs ($F_{3,59} = 24,46$, $P < 0,001$, et $F_{1,0} = 27,25$, $P < 0,001$, pour les DD supérieures à 25 °C et les DD inférieures à 5 °C, respectivement ; tableau 1). Nous avons de même observé des effets significants du type de culture et de la méthode de piégeage sur l'abondance (tableau 1 ; figure S1).

Pour visualiser l'effet négatif des DD cumulés inférieurs à 5 °C et des abondances saisonnières, nous avons utilisé le GAMM pour prédire l'abondance saisonnière échelonnée dans le temps, tout en fixant d'autres effets principaux simulant les conditions printanières (température mensuelle moyenne à 10 °C, et DD cumulés supérieurs à 25 °C à 10 °C/mois). Nous avons prédit l'abondance relative à 0, 5, 10, 50 et 100 DD cumulés inférieurs à 5 °C. Dans un modèle utilisant des pièges à vinaigre de cidre de pomme, c'est-à-dire le type de culture et la méthode de piégeage les plus courants (figure 4). En général, il y a une augmentation de l'abondance à partir du milieu de l'été qui atteint un pic vers novembre ou mai pour les hémisphères nord et sud, respectivement, puis chute de façon dramatique. Les effets d'une

DD cumulée de 50 et 100 °C/mois en dessous de 5 °C se traduisent par de fortes réductions visibles des abondances précoces et maximales, alors qu'il n'y a pratiquement aucun effet d'une DD de 5 ou 100 °C/mois.

10 °C/mois ont accumulé des DD inférieures à 5 °C par rapport à 0. En explorant le lien entre les abondances précoces et maximales, nous avons trouvé une relation négative faible mais significative entre le jour de la first détection et le nombre quotidien maximal de flies capturées pendant la saison, c'est-à-dire qu'une first capture plus précoce a entraîné un pic d'abondance plus élevé ($F_{1,393} = 38,9$, $P < 0,001$; figure 5).

4 DISCUSSION

Les études régionales sur la biologie des populations de *D. suzukii* s'accumulent depuis son invasion à travers l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud, mais jusqu'à présent, aucun effort n'a été fait pour synthétiser les données d'abondance field à une plus grande échelle. Ici, nous avons passé en revue les données locales publiées sur les captures saisonnières par piège afin d'étudier les mécanismes généraux de la dynamique saisonnière de la population de *D. suzukii* dans des contextes locaux, à travers sa distribution mondiale, à la fois dans son aire de répartition indigène et envahissante.^{11,12} La connaissance de l'aire de répartition géographique et de l'abondance de la population est cruciale pour entreprendre une modélisation prédictive et améliorer les nouvelles stratégies de gestion qui sont proactives, durables³⁶ et **benefit aux** agriculteurs, aux praticiens et aux membres de l'industrie horticole.

Comme prévu, notre méta-analyse a confirmé que la dynamique

de la population est très saisonnière, similaire aux findings de toutes les études locales que nous avons examinées,^{13–22,37–45} mais présente un schéma global. Nos résultats ont indiqué une augmentation des captures dans les pièges de début mars à fin novembre dans l'hémisphère nord et autour de début septembre à fin mai dans l'hémisphère sud, également en accord avec les findings régionaux.

En mettant en relation les abondances saisonnières avec les prédicteurs environnementaux, spécifiquement la température, nous n'avons pas trouvé d'effet fort de la température moyenne du mois précédent ; cependant, nous avons trouvé des effets négatifs forts de l'exposition à des températures élevées et basses pendant le mois précédent. Ceci est cohérent avec l'idée que les températures extrêmes sont plus importantes que les températures moyennes pour déterminer les limites de développement et de survie, spécialement pour les ectothermes. Il a été démontré pour les espèces de *drosophiles* que la tolérance aux températures extrêmes (par exemple pendant les périodes de froid hivernal ou les vagues de chaleur estivales), contraint la distribution des espèces,^{46–48} et les modèles corrélatifs suggèrent également que la distribution des *D. suzukii* est limité par les basses températures, en particulier aux limites nord et sud de son aire de répartition.^{10,11,49} Plutôt que d'utiliser un seul seuil thermique, nous avons utilisé la méthode de calcul de l'indice général de température.

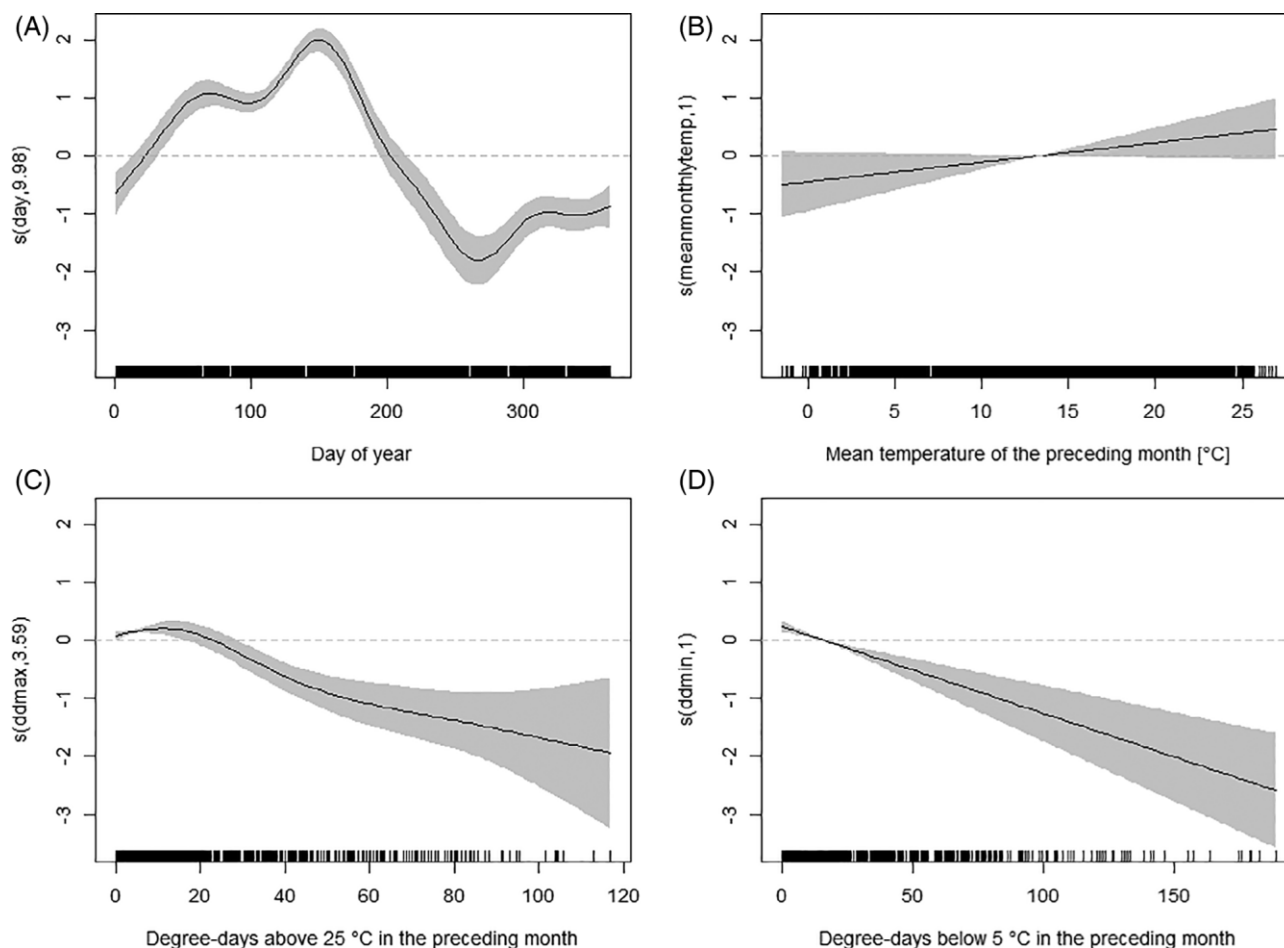


FIGURE 3. Effets des covariables individuelles sur l'abondance de *Drosophila suzukii*. Graphiques de dépendance partielle montrant la réponse marginale des lissages de l'abondance graduée à : (A) $s(\text{jour})$, jours après le 1er juillet dans l'hémisphère nord (ou le 1er janvier dans l'hémisphère sud) ; (B) $s(\text{meanmonthlytemp})$, température moyenne du mois précédent ; (C) $s(\text{ddmax})$, degrés-jours cumulés supérieurs à 25 °C au cours du mois précédent ; et (D) $s(\text{ddmin})$, degrés-jours cumulés inférieurs à 5 °C au cours du mois précédent. Les étiquettes de l'axe des y dans tous les graphiques contiennent le nom de la covariable et les degrés de liberté estimés pour un lisseur donné. Des lignes de tirets horizontales sont affichées à la réponse = 0 pour référence, afin de différencier les effets croissants et décroissants des covariables.

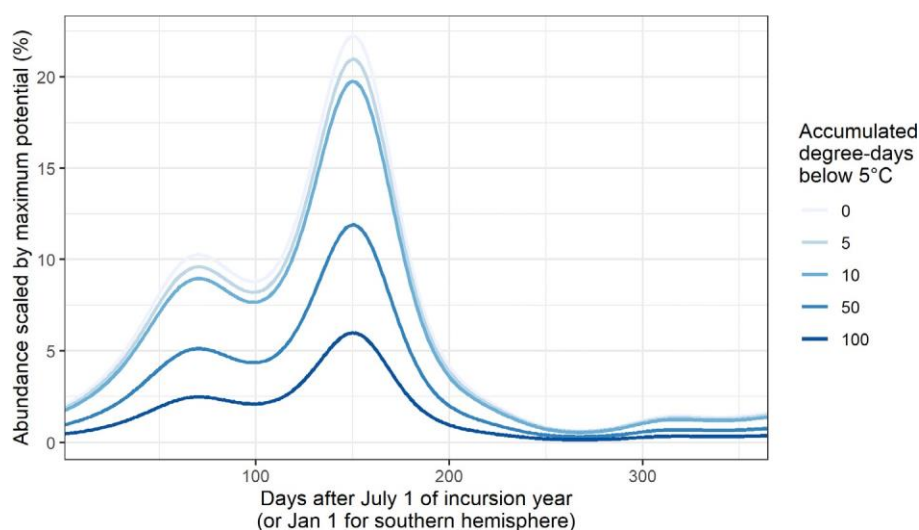


FIGURE 4. Effets prédits des degrés-jours cumulés inférieurs à 5 °C sur l'abondance. Abondance saisonnière prédite (maximum observable pour un lieu donné), en supposant une température mensuelle moyenne de 10 °C, des degrés-jours cumulés supérieurs à 25 °C de 10, des degrés-jours cumulés inférieurs à 5 °C de 0, 5, 10, 50 et 100, en utilisant des pièges à vinaigre de cidre de pomme dans une culture de raisin.

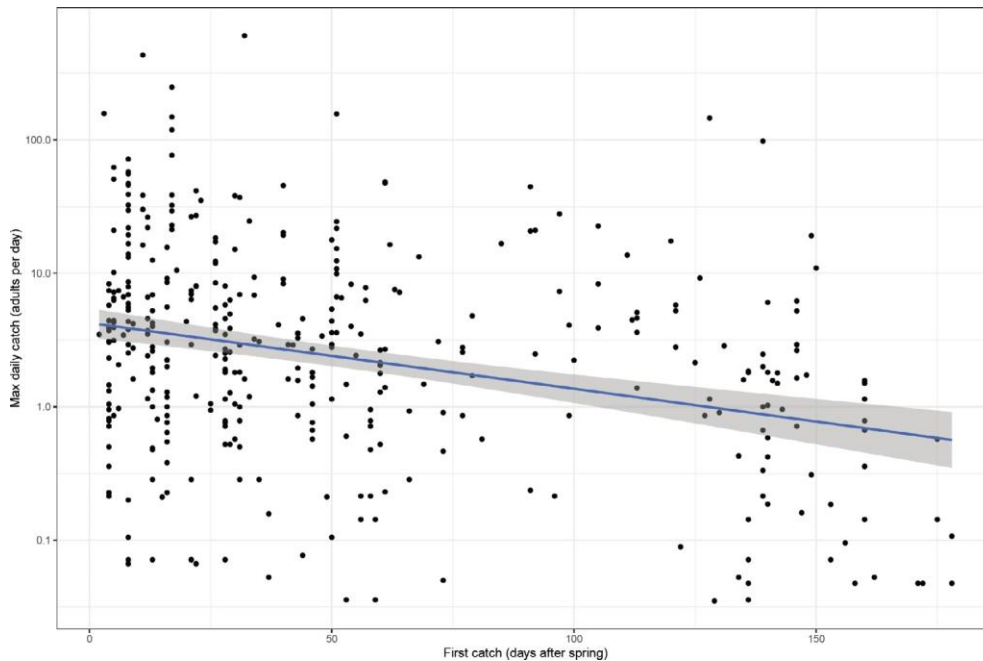


FIGURE 5. Relation entre la date de la **first** capture et les captures quotidiennes maximales. Diagramme de dispersion montrant la capture quotidienne maximale d'adultes capturés par piège par jour (log-transformée), résumée pour chaque étude, culture et année en fonction de l'heure de la **first** capture en nombre de jours après le printemps (1er mars pour l'hémisphère nord ou 1er septembre pour l'hémisphère sud). La ligne bleue continue représente la régression linéaire et la zone grise ombrée représente l'intervalle de confiance à 95 % autour de la régression.

Le concept des degrés-jours, qui combine la gravité de l'exposition thermique et la durée. Il s'agit d'une méthode standard dans la gestion des cultures, telle que la programmation des traitements insecticides pour coïncider avec les prévisions de forte pression parasitaire,⁵⁰ et récemment, des modèles prédictifs de DD basés sur la physiologie ont été employés pour prévoir la phénologie locale de *D. sukii* avec un succès variable.^{27,28,44,51} Ces modèles ignorent généralement l'accumulation de température en dehors des extrêmes et se concentrent plutôt sur l'accumulation de température dans la gamme qui permet le développement. Par exemple, Kamiyama *et al.*²⁸ ont mis en œuvre l'accumulation de température entre une limite inférieure de 7,2 °C et une limite supérieure de 30 °C, car le développement de *D. sukii* cesse en dehors de ces températures.⁵² Cela revient à utiliser des températures optimales comme décrit ci-dessus. Nous soutenons que les extrêmes thermiques ne doivent pas être négligés dans l'explication de la dynamique des populations, ce qui est soutenu par notre **finalisation de** la forte association de l'abondance saisonnière avec les DD accumulées inférieures à 5 °C et supérieures à 25 °C au cours du mois précédent. En dehors de la plage de température optimale, le stress thermique s'accumule à des taux beaucoup plus élevés, comme cela a été montré récemment pour une série de drosophiles, y compris *D. sukii*.⁵³ Ceci est cohérent avec nos observations de diminutions quasi-linéaires des captures dans les pièges avec l'augmentation du nombre de DDs en dessous de 5 °C et au-dessus de 25 °C.

Nos résultats indiquent que des périodes prolongées de chaleur intense (par exemple une vague de chaleur estivale) réduisent l'abondance des populations. Plusieurs études ont montré que les populations de *D. sukii* augmentent au début du printemps, puis diminuent pendant les mois d'été les plus chauds lorsque les précipitations sont faibles et que les températures dépassent 30 °C, pour ensuite atteindre à nouveau un pic en automne.^{15,17,22,24,51,54} L'absence de captures à des températures élevées et le modèle prédisant une abondance plus faible avec des DD accumulées au-dessus de 25 °C pourraient être dus à une survie et/ou une reproduction réduites à ces températures,^{52,55} un manque d'activité et de

dispersion à des températures entre 25 et 30 °C,³⁷ ou une migration vers des altitudes plus élevées vers d'autres sources de nourriture et des conditions plus froides, comme suggéré par Mitsui *et al.*⁵⁶

Abondance saisonnière globale de *Drosophila*
 De même, la diminution linéaire des captures dans les pièges avec des DD cumulées inférieures à 5 °C au cours du mois précédent indique que les périodes précédentes de temps froid diminuent de manière significative l'abondance. Ainsi, nos résultats confirment les nombreuses observations selon lesquelles les basses températures sont le facteur limitant à la fois l'abondance globale de *D. suzukii* et le moment de la firme émergence.^{13,39,41,52} On pense que la principale contrainte sur l'abondance saisonnière est le nombre d'adultes hivernants,^{39,57} . Ainsi, des conditions hivernales rigoureuses ralentiront la constitution de la population au printemps et limiteront sévèrement l'abondance maximale potentielle au cours de la saison suivante.¹³ À l'appui de cette hypothèse, nous avons trouvé une relation négative entre le moment de la first capture du piège et le nombre maximal de flies adultes pendant la saison, ce qui signifie que plus la first capture est tardive, plus l'abondance maximale de la saison est faible. Des résultats similaires ont été trouvés dans un ensemble de données de suivi sur 7 ans, dans lequel les captures maximales étaient prédites par la date de la first capture, ainsi que par les captures au piège des années précédentes, suggérant des populations hivernantes.⁴⁴ Drummond *et al.*²³ ont également constaté que plus *D. suzukii* était capturé tôt dans un field, plus

l'abondance relative était élevée au cours de la saison de croissance suivante. Compte tenu de ces effets du froid hivernal, il pourrait y avoir une certaine capacité à développer un système d'alerte précoce dans les régions touchées, ce qui bénéficierait aux agriculteurs qui pourraient utiliser cette approche basée sur le risque pour informer la planification de la gestion mersionnelle.

Malgré les effets assez clairs des températures extrêmes hautes et basses, les prédictors inclus dans le GAMM ne représentent qu'environ 22% de la variance de l'abondance saisonnière, ce qui suggère qu'il existe d'autres facteurs d'abondance significants que la température. Ceci n'est pas surprenant étant donné le large éventail de cultures, de régimes de gestion et d'options de piégeage englobés par notre ensemble de données compilées. D'autres facteurs importants peuvent inclure le type, la variété et la disponibilité des plantes,^{16,58} le nombre et la distance des plantes hôtes non cultivées,^{20,42,59} la phénologie de la fructification, les refuges des microclimats,⁶⁰ et les prédateurs et parasitoïdes.⁶¹ De même, d'autres facteurs liés à la gestion, tels que l'utilisation de produits chimiques,²⁷ et l'utilisation de pesticides, peuvent être pris en compte.

les calendriers de récolte⁵⁴ peuvent avoir un fort impact sur les abondances de population de *D. suzukii* observées dans les cultures.

Il faut noter dans cette étude (et plus généralement dans les études d'abondance des ravageurs **sur le field**) que si les captures par les pièges sont une mesure de l'abondance in-field, **elles ne reflètent pas nécessairement les véritables abun-** dances et donc le risque pour les cultures.^{22,23,62} Pendant les périodes d'abondance de fruits mûrs, les pièges sont en compétition directe avec les sources de nourriture cultivées et non cultivées pour attirer les **flies** adultes. Hamby *et al.*¹⁴ ont constaté que, bien que les données des pièges soient souvent en corrélation avec les taux d'infestation, des exemples de forte infestation larvaire avec de faibles captures par les pièges étaient présents à toutes les saisons, mettant en garde contre l'utilisation des captures par les pièges comme base des décisions de gestion. Néanmoins, à l'heure actuelle, les données des pièges exprimées de manière cohérente dans toutes les études représentent les meilleures données comparatives disponibles.

Il y a quelques lacunes importantes dans les connaissances et donc des limitations de la modélisation entreprise ici, et en général pour la modélisation de la distribution des espèces. Un déterminant important de l'abondance saisonnière que nous n'avons pas pu prendre en compte dans notre étude, et que la plupart des modèles à notre connaissance ne parviennent pas à intégrer, est celui des effets d'acclimatation. Le fait que *D. suzukii* ait des morphes d'été et d'hiver distincts avec des tolérances thermiques **significativement différentes**,^{52,63} et qu'il puisse induire une diapause reproductive dans des conditions froides⁶⁴ représente une limitation cruciale dans les modèles prédictifs de l'abondance saisonnière.²⁷ Une autre limite largement reconnue dans les modèles prédictifs est que les données de température environnementale utilisées comme prédicteurs pour relier la tolérance thermique aux distributions géographiques ou aux abun- dances sont trop simplistes.^{65,66} Les estimations grossières de la température environnementale, généralement basées sur la température de l'air mesurée à 2 m au-**dessus du sol, ne reflètent** pas de manière adéquate l'environnement microclimatique que connaissent la plupart des petits organismes. Ces microclimats sont affectés par la couverture végétale, le terrain, les structures humaines, le vent, le rayonnement solaire et l'humidité du sol.^{66,67} La différence entre la température standard de l'air et la température mesurée près de la surface du sol ou à l'intérieur de la végétation peut dépasser 10 °.

C. ⁶⁸ Les nouveaux développements dans les modèles de microclimat, les logiciels et les bases de données^{67,69,70} montrent des possibilités futures prometteuses pour des modèles plus précis de distribution et de prédiction de l'abondance des espèces.

5 CONCLUSION

En conclusion, nous présentons un modèle qui peut être utilisé pour prédire

Le potentiel d'activité de *D. suzukii* **en début de saison au bénéfice** des agriculteurs et des autres praticiens du secteur. Cependant, si les captures par piège sont une mesure de l'abondance in-field, **elles ne reflètent pas nécessairement de manière exacte le** risque pour les cultures. Par conséquent, ce modèle devrait être utilisé pour soutenir, plutôt que de remplacer, les efforts de surveillance in-field **en améliorant** la connaissance de la façon dont les facteurs climatiques affectent l'activité de la population de *D. suzukii*. L'impact négatif des températures élevées suggère que les stratégies de gestion de fin de saison se concentrant sur la manipulation du microclimat des cultures à des températures supérieures à 25 °C peuvent réduire l'abondance de *D. suzukii*.

Nous montrons que l'abondance en début de saison est modulée par le climat, en particulier par la profondeur des extrêmes de froid subis au cours de la période précédente. Compte tenu de ces relations, il pourrait être possible de développer un système d'alerte précoce pour les cultures et les régions touchées.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Helle Mathiasen et Johannes Overgaard pour leurs précieuses discussions sur le manuscrit. Cette recherche a été financée par l'Independent Research Fund Denmark, le Technology and Pro- duction Research Council (0170-00006B à MØ), et par Hort

Abondance saisonnière globale de *Drosophila suzukii* en Australie (MT18040 à JL, PU et JM), en utilisant les prélèvements pour la recherche et le développement des baies de paille, des framboises et des mûres, des cerises et des fruits d'été et les contributions du gouvernement australien.

CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs ont déclaré qu'ils n'avaient pas d'intérêts concurrents.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Des informations complémentaires sont disponibles dans la version en ligne de cet article.

RÉFÉRENCES

- Lee JC et Sial A, Liste de référence des fruits avec *Drosophila suzukii*. https://eorganic.info/sites/eorganic.info/files/u461/SWD-hostlist-by_reference.pdf. Consulté le 6 octobre 2016 (2016).
- Hauser M, Un récit historique de l'invasion de *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera : Drosophilidae) dans les États-Unis continentaux, avec des remarques sur leur identification. *Pest Manage Sci* **67** : 1352-1357 (2011).
- Calabria G, Máca J, Bächli G, Serra L et Pascual M, Premiers signalements de l'espèce potentiellement nuisible *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) en Europe. *J Appl Entomol* **136**:139-147 (2012).
- Deprá M, Poppe JL, Schmitz HJ, De Toni DC et Valente VLS, Les first enregistrements du ravageur invasif *Drosophila suzukii* sur le continent sud-américain. *J Pest Sci* **87**:379-383 (2014).
- Boughdad A, Haddi K, El Bouazzati A, Nassiri A, Tahiri A, El Anbri C et al, Premier signalement de la drosophile à ailes tachetées envahissante infestant les cultures de baies en Afrique. *J Pest Sci* **94**:261-271 (2021).
- Kwatha CA, Okwaro LA, Kleman I, Rehmann G, Revadi S, Ndlela S et al, Détection de la drosophile à ailes tachetées, *Drosophila suzukii*, en Afrique subsaharienne continentale. *J Pest Sci* **95**:251-259 (2021).
- Bolda MP, Boughdad A, Zalom FG, Spotted wing drosophila : potential economic impact of a newly established pest. *Agric Resour Econ Update* **13**:5-8 (2010).
- Lee JC, Bruck DJ, Dreves AJ, Ioriatti C, Vogt H et Baufeld P, In focus : spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii*, across perspectives. *Pest Manage Sci* **67**:1349-1351 (2011).
- Maino JL, Schouten R et Umina P, Predicting the global invasion of *Drosophila suzukii* to improve Australian biosecurity preparedness. *J Appl Ecol* **58**:789-800 (2021).
- dos Santos LA, Mendes MF, Krüger AP, Blauth ML, Gottschalk MS et Garcia FRM, Distribution potentielle mondiale de *Drosophila suzukii* (Diptera, Drosophilidae). *PLoS One* **12**:e0174318 (2017).
- Ørsted IV et Ørsted M, Les modèles de distribution des espèces de la drosophile à ailes tachetées (*Drosophila suzukii*, Diptera : Drosophilidae) dans son aire de répartition indigène et envahissante révèlent un changement de niche écologique. *J Appl Ecol* **56**:423-435 (2019).
- Reyes JA et Lira-Noriega A, Distribution potentielle mondiale actuelle et future de la fly *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae). *Can Entomol* **152**:587-599 (2020).
- Dalton DT, Walton VM, Shearer PW, Walsh DB, Caprile J et Isaacs R, Survie en laboratoire de *Drosophila suzukii* dans des conditions hivernales simulées du Pacific Northwest et piégeage saisonnier field dans cinq régions primaires de production de petits fruits et de fruits à noyau aux États-Unis. *Pest Manage Sci* **67**:1368-1374 (2011).
- Hamby KA, Bolda MP, Sheehan ME et Zalom FG, Surveillance saisonnière de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans les framboises commerciales de Californie. *Environ Entomol* **43**:1008-1018 (2014).
- Harris DW, Hamby KA, Wilson HE et Zalom FG, Suivi saisonnier de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans un système mixte de production de fruits. *J Asia-Pac Entomol* **17**:857-864 (2014).
- Haviland D, Caprile-Emeritus J, Rill S, Hamby K et Grant J, La phénologie de la drosophile à ailes tachetées dans la vallée de San Joaquin varie selon la mer- son, la culture et la végétation à proximité. *California Agric* **70**:24-23 (2016).
- Arnó J, Solà M, Riudavets J et Gabarra R, Dynamique de la population, hôtes non cultivés et sensibilité des fruits de *Drosophila suzukii* dans le nord-est de l'Espagne. *J Pest Sci* **89**:713-723 (2016).

- 18 Del Fava E, Ioriatti C et Melegaro A, Cost-benefit analysis of controlling the spotted wing drosophila (*Drosophila suzukii* (Matsumura)) spread and infestation of soft fruits in Trentino, Northern Italy. *Pest Manage Sci* **73**:2318-2327 (2017).
- 19 Klesener DF, dos Santos RSS, Gebler L et Marchioreto LDR, R, Population fluctuation et infestation de *Drosophila suzukii* dans les cultures de baies dans le sud du Brésil. *Afr J Agric Res* **13**:499-511 (2018).
- 20 Elsensohn JE et Loeb GM, Non-crop host sampling yields insights into small-scale population dynamics of *Drosophila suzukii* (Matsumura). *Insectes* **9**:5 (2018).
- 21 Kirkpatrick DM, Gut LJ et Miller JR, Estimation de la portée du panache des pièges de surveillance et de la zone de piégeage de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans les cerises acides du Michigan. *J Econ Entomol* **111**:1285-1289 (2018).
- 22 Briem F, Dominic AR, Golla B, Hoffmann C, Englert C, Herz A *et al*, Analyse exploratoire des données des captures de pièges de *Drosophila suzukii* d'un programme de surveillance de sept ans dans le sud-ouest de l'Allemagne. *Insectes* **9** : 125 (2018).
- 23 Drummond F, Ballman E et Collins J, Dynamique de la population de la drosophile à ailes tachetées (*Drosophila suzukii* (Matsumura)) dans la myrtille sauvage du Maine (*Vaccinium angustifolium* Aiton). *Insectes* **10**:205 (2019).
- 24 Hamby KA, Bellamy DE, Chiu JC, Lee JC, Walton VM, Wiman NG *et al*, Facteurs biotiques et abiotiques ayant un impact sur le développement, le comportement, la phénologie et la biologie de la reproduction de *Drosophila suzukii*. *J Pest Sci* **89** : 605-619 (2016).
- 25 Ørsted IV et Ørsted M, Les données de : modèles de distribution des espèces de la drosophile à ailes tachetées (*Drosophila suzukii*, Diptera : Drosophilidae) dans son aire de répartition indigène et invasive révèlent un changement de niche écologique. *J Appl Ecol* **56**:423-435 (2018).
- 26 Sparks A, Hengl T et Nelson A, GSODR : résumé global des données météorologiques quotidiennes en R. *J Open Source Software* **2**:117 (2017).
- 27 Wiman NG, Dalton DT, Anfora G, Biondi A, Chiu JC, Daane KM *et al*, *Drosophila suzukii* population response to environment and management strategies. *J Pest Sci* **89**:653-665 (2016).
- 28 Kamiyama MT, Bradford BZ, Groves RL et Guédot C, Degree day models to forecast the seasonal phenology of *Drosophila suzukii* in tart cherry orchards in the Midwest U.S., ed. by Biondi A. *PLoS One* **15**:e0227726 (2020).
- 29 Luedeling E, chillR : méthodes statistiques pour l'analyse de la phénologie dans les fruits tempérés. Paquet R version 0.70.15 (2019). Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/chillR/index.html>.
- 30 Bolker BM, Brooks ME, Clark CJ, Geange SW, Poulsen JR, Stevens MHH *et al*, Generalized linear mixed models : a practical guide for ecology and evolution. *Trends Ecol Evol* **24**:127-135 (2009).
- 31 Zuur A, Ieno EN, Walker N, Saveliev AA et Smith GM, *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, New York (2009).
- 32 Frost KE, Esker PD, Van Haren R, Kotolski L et Groves RL, Patterns saisonniers de l'abondance de la cicadelle de l'aster (Hemiptera : Cicadellidae) et de l'infectivité du phytoplasme de la jaunisse de l'aster dans les champs de carottes du Wisconsin. *Environ Entomol* **42**:491-502 (2013).
- 33 Box GEP, Jenkins G et Reinsel G, *Time Series Analysis : Forecasting and Control*, 3rd edn. Holden-Day, San Francisco (1994).
- 34 Pinheiro J et Bates D, *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer, New York (2000).
- 35 OEPP. Organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des plantes (OEPP). Nouvelles données sur les organismes de quarantaine et les organismes nuisibles de la Liste d'alerte de l'OEPP. Service d'Information de l'OEPP **4**:67. Disponible sur : <https://gd.eppo.int/reporting/article-6745> [2 jan 2021].
- 36 Uden DR, Allen CR, Angeler DG, Corral L et Fricke KA, Adaptive invasive species distribution models : a framework for modeling incipient invasions. *Biol Invasions* **17**:2831-2850 (2015).
- 37 Kinjo H, Kunimi Y et Nakai M, Effets de la température sur la reproduction et le développement de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae). *Appl Entomol Zool* **49**:297-304 (2014).
- 38 Mazzetto F, Pansa MG, Ingegno BL, Tavella L et Alma A, Surveillance de la fly exotique *Drosophila suzukii* dans les vergers de fruits à noyau, à pépins et à baies dans le nord-ouest de l'Italie. *J Asia Pac Entomol* **18**:321-329 (2015).
- 39 Rossi-Stacconi MV, Kaur R, Mazzoni V, Ometto L, Grassi A, Gottardello A *et al*, Multiple lines of evidence for reproductive winter diapause in the invasive pest *Drosophila suzukii* : useful clues for control strategies. *J Pest Sci* **89**:689-700 (2016).
- 40 Manduric S, *Drosophila suzukii* - expériences de la fly la région la plus habitée du nord (du first enregistrement à deux ans après la détection). *IOBC-WPRS Bull* **123**:150-156 (2017).
- 41 Thistlewood HMA, Gill P, Beers EH, Shearer PW, Walsh DB, Rozema BM *et al.*, Spatial analysis of seasonal dynamics and overwintering of

- Abondance saisonnière globale de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans le bassin de l'Okanagan-Columbia, 2010-2014. *Environ Entomol* **47**:221-232 (2018).
- 42 Thistlewood HMA, Rozema B et Acheampong S, Infestation and timing of use of non-crop plants by *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera : Drosophilidae) in the Okanagan Basin, Canada. *Can Entomol* **151**:34-48 (2019).
 - 43 Guédot C, Avanesyan A et Hietala-Henschell K, Effet de la température et de l'humidité sur la phénologie saisonnière de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) au Wisconsin. *Environ Entomol* **47**:1365-1375 (2018).
 - 44 Leach H, Van Timmeren S, Wetzel W, et Isaacs R, Prédire la variation intra et interannuelle de l'activité de la drosophile à ailes tachetées (Diptera : Drosophilidae) envahissante dans une région tempérée. *Environ Entomol* **48**:1223-1233 (2019).
 - 45 Tait G, Cagianca A, Grassi A, Pfab F, Oppedisano T, Puppato S *et al*, *Drosophila suzukii* daily dispersal between distinctly different habitats. *Entomologia Generalis* **40**:25-37 (2020).
 - 46 Kellermann V, Overgaard J, Hoffmann AA, Fløjgaard C, Svenning J-C et Loeschcke V, Les limites thermiques supérieures de *Drosophila* sont liées aux distributions des espèces et fortement contraintes phylogénétiquement. *Proc Natl Acad Sci U S A* **109**:16228-16233 (2012).
 - 47 Overgaard J, Kearney MR et Hoffmann AA, La sensibilité aux extrêmes thermiques chez la drosophile australienne implique des impacts similaires du changement climatique sur la distribution des espèces répandues et tropicales. *Glob Chang Biol* **20**:1738-1750 (2014).
 - 48 Williams CM, Henry HAL et Sinclair BJ, Cold truths : how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change : organismal responses to winter climate change. *Biol Rev* **90**:214-235 (2015).
 - 49 de la Vega GJ et Corley JC, La modélisation de la distribution de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) améliore notre compréhension des limites de l'aire de répartition des ravageurs. *Int J Pest Manage* **65**:217-227 (2019).
 - 50 Wilson LT et Barnett WW, Degree-days : an aid in crop and pest management. *California Agric* **37**:4-7 (1983).
 - 51 Wiman NG, Walton VM, Dalton DT, Anfora G, Burrack HJ, Chiu JC *et al*, Intégration des données de la table de survie en fonction de la température dans un modèle de projection matricielle pour l'estimation de la population de *Drosophila suzukii*. *PLoS One* **9**:e106909 (2014).
 - 52 Tochen S, Dalton DT, Wiman N, Hamm C, Shearer PW et Walton VM, Développement lié à la température et paramètres de population pour *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) sur cerisier et myrtille. *Environ Entomol* **43**:501-510 (2014).
 - 53 Jørgensen LB, Malte H et Overgaard J, Comment évaluer la tolérance à la chaleur de *Drosophila suzukii* : unifier les essais de tolérance statique et dynamique pour prédire les limites de distribution de la chaleur. *Funct Ecol* **33**:629-642 (2019).
 - 54 Wang X-G, Stewart TJ, Biondi A, Chavez BA, Ingels C, Caprile J *et al*, Dynamique et écologie de la population de *Drosophila suzukii* en Californie centrale. *J Pest Sci* **89**:701-712 (2016).
 - 55 Kimura MT, La tolérance au froid et à la chaleur des **flies** drosophiles avec référence à leurs distributions latitudinales. *Oecologia* **140**:442-449 (2004).
 - 56 Mitsui H, Beppu K et Kimura MT, Cycles de vie saisonniers et utilisation des ressources des **flower-** et fruit-feeding drosophilid **flies** (Diptera : Drosophilidae) dans le centre du Japon. *Entomol Sci* **13**:60-67 (2010).
 - 57 Panel A, Zeeman L, van der Sluis B, van Elk P, Pannebakker B, Wertheim B *et al*, Les *Drosophila suzukii* hivernées sont la principale source d'infestations des **first** cultures fruitières de la saison. *Insectes* **9**:145 (2018).
 - 58 Lee JC, Bruck DJ, Curry H, Edwards D, Haviland DR, Steenwyk RAV *et al*, La susceptibilité des petits fruits et des cerises à la drosophile à ailes tachetées, *Drosophila suzukii*. *Pest Manage Sci* **67**:1358-1367 (2011).
 - 59 Weißinger L, Schieck K, Bauer M, Müller C, Infeldt S, Les limites des mûres sur la dynamique des populations de *Drosophila suzukii* et l'infestation des raisins dans les vignobles adjacents. *J Appl Entomol* **143**:802-812 (2019).
 - 60 Evans RK, Toews MD et Sial AA, Périodicité diurne de *Drosophila suzukii* (Diptera : Drosophilidae) dans des conditions de **field**. *PLoS One* **12** : e0171718 (2017).
 - 61 Gabarra R, Riudavets J, Rodríguez GA, Pujade-Villar J et Arnó J, Prospects pour le contrôle biologique de *Drosophila suzukii*. *BioControl* **60** : 331-339 (2015).
 - 62 Alnajjar G, Drummond FA et Groden E, Laboratoire et **field** **adaptability** de *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera : Drosophilidae) aux mycoses fongiques entomo- pathogènes. *J Agric Urban Entomol* **33**:111-132 (2017).
 - 63 Shearer PW, West JD, Walton VM, Brown PH, Svetec N et Chiu JC, Seasonal cues induce phenotypic plasticity of *Drosophila suzukii* to enhance winter survival. *BMC Ecol* **16**:11 (2016).
 - 64 Toxopeus J, Jakobs R, Ferguson LV, Garipey TD et Sinclair BJ, Reproductive arrest and stress resistance in winter-acclimated *Drosophila suzukii*. *J Insect Physiol* **89**:37-51 (2016).

- 65 Rebaudo F, Faye E et Dangles O, Les données de microclimat améliorent les prédictions des modèles d'abondance d'insectes basés sur des températures spatio-temporelles calibrées. *Front Physiol* **7**:139 (2016).
- 66 Lembrechts JJ, Nijs I et Lenoir J, Incorporation du microclimat dans les programmes d'éducation spécialisée. *Ecography* **42**:1267-1279 (2019).
- 67 Kearney MR, Isaac AP et Porter WP, microclim : estimations mondiales du microclimat horaire basées sur des moyennes climatiques mensuelles à long terme. *Sci Data* **1**:1-9 (2014).
- 68 Suggitt AJ, Gillingham PK, Hill JK, Huntley B, Kunin WE, Roy DB *et al.*, Les microclimats de l'habitat entraînent une variation à la fine échelle des températures extrêmes. *Oikos* **120**:1-8 (2011).
- 69 Kearney MR et Porter WP, NicheMapR - un paquetage R pour la biophysique. modélisation : le modèle de microclimat. *Ecography* **40**:664-674 (2017).
- 70 Lembrechts JJ, Aalto J, Ashcroft MB, Frenne PD, Kopecky M, Lenoir J *et al.*, SoilTemp : une base de données mondiale de la température proche de la surface. *Glob Chang Biol* **26**:6616-6629 (2020).

