

# Influence du réchauffement climatique sur la dynamique des populations de *Scaphoideus titanus* en Romandie

Baptiste SNEIDERS<sup>1</sup>, Dominique FLEURY<sup>2</sup>, Stéphane GOYETTE<sup>3</sup> et Mauro JERMINI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève, Suisse

<sup>2</sup> Office cantonal de l'agriculture et de la nature, 1228 Plan-les-Ouates, Suisse

<sup>3</sup> Nonlinearity and Climate Group, Université de Genève, Genève, Suisse

<sup>4</sup> Agroscope, 6593 Cadenazzo, Suisse

Renseignements: Dominique Fleury, tél. +41 22 388 71 71, e-mail: dominique.fleury@etat.ge.ch



Adulte de *Scaphoideus titanus*. (Photo Agroscope, Arnaud Conne)

## Introduction

En raison du réchauffement climatique planétaire et de celui particulièrement marqué en Suisse, le développement de certains insectes sera fortement accéléré (Bloesch et De Siebenthal 1988). La viticulture helvétique pourrait souffrir d'un impact plus prononcé des insectes ravageurs (OcCC 2007). Parmi ces insectes, la cicadelle *Scaphoideus titanus* Ball (Hemiptera: Cicadellidae) a reçu une attention particulière au cours des quinze dernières années, puisqu'elle est le

vecteur principal de la flavescence dorée (Schvester et al. 1961), une grave maladie de la vigne causée par le phytoplasme *Candidatus phytoplasma vitis* (IRPCM 2004). La maladie fait l'objet de mesures officielles visant à endiguer sa propagation, du fait de son caractère épidémique et d'un impact économique négatif élevé. Pour ces raisons, elle est inscrite comme organisme de quarantaine et soumise à une lutte obligatoire (OPV 2010).

*S. titanus* a été observé pour la première fois en France en 1958 (Bonfils et Schvester 1960); sa propa-

gation en Europe semble principalement liée aux activités humaines plutôt qu'à de multiples introductions (Papura *et al.* 2009). Actuellement, son expansion est limitée au nord par l'impossibilité d'effectuer un cycle de vie complet à cause d'une saison trop courte (Chuche 2010). En Suisse, il a été signalé pour la première fois au Tessin en 1967 et dans le canton de Genève en 1996. En 2007 et 2016 respectivement, il a été capturé dans les cantons de Vaud et du Valais (Schaub et Linder 2007; Linder *et al.* 2019). Au Tessin, la flavescence dorée est apparue en 2004 (Schaerer *et al.* 2007) et l'application des mesures de lutte obligatoire a été imposée. Malgré l'intensification de la surveillance du vignoble suisse, cette maladie de quarantaine a fait son apparition dans les cantons de Vaud et du Valais en 2015 et 2016 respectivement (Schaerer et Linder 2017).

L'objectif de cette étude est d'estimer l'impact qu'auraient deux scénarios de réchauffement climatique futur sur le cycle de vie, la distribution des populations de *S. titanus* en Suisse et la possibilité de produire une hypothétique seconde génération.

## Méthodes

### Données météorologiques utilisées

Les observations de la température de l'air au niveau de l'abri météorologique (à 2 m du sol) de MétéoSuisse, obtenues par l'intermédiaire du portail d'IDAweb, ont été utilisées. Elles sont facilement accessibles aux chercheurs au format .csv et couvrent une large plage temporelle. Les températures horaires sur la période du 31 décembre 1981 au 13 juin 2018 de six stations météorologiques (tabl. 1) jugées représentatives des différentes régions viticoles considérées, ont été employées dans cette étude. Une correction hydrostatique utilisant un gradient vertical moyen de 6,5°C/km leur a été appliquée pour s'affranchir de biais liés à la différence d'altitude

entre la station météorologique et l'altitude effective des sept vignobles à l'étude.

Afin de représenter l'effet du réchauffement climatique à l'emplacement des vignobles, les séries temporelles observées de T2m sont perturbées à l'aide de la méthode dite «des deltas» (Ruiter 2012). Ces deltas expriment les taux de réchauffement tels que calculés sur la maille d'un modèle climatique régional de haute résolution spatiale. Alors, les séries temporelles observées de T2m sont modifiées avec le temps de telle manière qu'elles représentent une évolution réaliste au cours du XXI<sup>e</sup> siècle à des taux correspondant aux forçages relatifs aux scénarios d'émission de gaz à effet de serre.

**Résumé** La cicadelle *Scaphoideus titanus* est vectrice de la flavescence dorée de la vigne, grave maladie à phytoplasme. La distribution potentielle de *S. titanus*, son cycle de vie et la possibilité d'une seconde génération ont été estimés aux horizons 2050 et 2070. Deux scénarios de réchauffement ont été choisis: réduction (RCP2,6) et augmentation (RCP8,5) des émissions de gaz à effet de serre dès 2050. Les valeurs écologiques de *S. titanus* ont été croisées avec une émulation des températures selon la méthode des deltas. Selon le RCP2,6 et RCP8,5, sa distribution devrait s'étendre au nord et en altitude, tout en se maintenant dans les régions où il est déjà établi. Les éclosions seraient plus précoces et étalées. A l'horizon 2070 (RCP8,5), la variabilité interannuelle des conditions météorologiques pourrait menacer la survie des populations. Enfin, le Tessin deviendrait de moins en moins adapté. Le scénario RCP8,5 permettrait de produire une hypothétique seconde génération.

**Tableau 1 | Vignobles considérés, localisation géographique et station météorologique de référence.**

Vignoble	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Altitude (m)	Station MétéoSuisse
Tsâlin (VS)	46,25	7,31	900	Sion
Contone (TI)	46,15	8,91	203	Magadino/Cadenazzo
Satigny (GE)	46,21	6,02	457	Genève/Cointrin
Changins (VD)	46,39	6,23	439	Changins
Châteauneuf (VS)	46,21	7,30	485	Sion
Lutry (VD)	46,50	6,68	440	Pully
Cressier (NE)	47,05	7,03	480	Cressier

Deux scénarios, dits Representative Concentration Pathway (RCP) (GIEC 2014), ont été considérés. Le modèle climatique numérique RCM HIRHAM5 Version 1 du Danish Meteorological Institute, appliqué dans le cadre du projet Euro-CORDEX, a quant à lui été retenu. Des RCM, tels que le modèle HIRHAM5, s'accorderaient à propos des températures moyennes, ainsi que les extrêmes actuels simulés (Beniston *et al.* 2007). Ayant un impact sur la mortalité des adultes et des œufs de *S. titanus*, ces extrêmes sont importants. Le domaine EUR-11, considérant les scénarios RCP2,6 (limitation du forçage radiatif à +2,6 W/m<sup>2</sup> d'ici à 2100) et RCP8,5 (limitation à +8,5 W/m<sup>2</sup>) du GIEC (2014), avec la variable T2m, à fréquence temporelle journalière, ces deux scénarios ont alors été utilisés.

Les températures futures ont été émuloées à partir des observations. Ces dernières ont été perturbées avec des changements simulés issus de résultats de simulations climatiques pour les horizons 2050 (2050–2087) et 2070 (2070–2107), avec les deux scénarios RCP précités. L'émulation fait donc évoluer les T2m locales de façon réaliste et représente l'effet du réchauffement climatique à une échelle plus fine que celle des modèles régionaux. Pour le calcul des deltas, des températures simulées horaires ont été utilisées; l'année a été subdivisée en douze mois, et les distributions en quartiles. C'est cette partition qui restitue au mieux les variations de températures lors de la confrontation de la simulation future avec la série de contrôle.

### Valeurs écologiques

Le calcul des degrés-jours (DJ) de développement de *S. titanus* utilise les températures horaires émuloées décrites précédemment. Les DJ ont été calculés sur la base de la moyenne journalière des températures horaires (Bloesch et De Siebenthal 1988); il existe peu de données précises concernant le développement de *S. titanus*. L'étude de Rigamonti *et al.* (2011) est utilisée comme base principale, complétée si nécessaire par d'autres données rapportées au seuil de développement, soit:  $T_0 = 8,7^{\circ}\text{C}$ . Les DJ pour chaque stade et pour le développement des stades L1 à l'adulte ont été obtenus selon l'équation suivante:

$$DJ = \sum_j^N (T_{m,j} - T_0) \forall T_{m,j} \geq T_0 \quad (1)$$

Avec  $T_{m,j}$  la température moyenne journalière au jour  $j$ . Les nombres de 195 (œufs à L1) et 50 DJ (L1 à L2) sont directement issus de Rigamonti *et al.* (2011), L1 à L5 désignent les cinq stades juvéniles de *S. titanus*. Le nombre de DJ pour les stades L2 à L5, non précisés chez Rigamonti *et al.* (2011), a été obtenu en considérant le rapport des DJ de chaque stade (L2 à L5) de Falzoi *et al.* (2014), rapportés aux nombres de DJ nécessaires au passage du stade L2 à l'adulte (526.3), issus du travail de Rigamonti *et al.* (2011). Le nombre de DJ pour atteindre l'accouplement et la ponte a été déterminé à partir des jours fournis par Rigamonti *et al.* (2017), et converti en DJ (Eq. 1). La dynamique d'éclosion est celle proposée par Chucho (2010), dont les jours ont été convertis en DJ (Eq. 1). Ce sont les ré-

**Tableau 2 | Paramètres de développement de *S. titanus* estimés à la suite de la revue de la littérature et nombres de DJ (température minimale de développement de 8,7°C) nécessaires à l'éclosion de 25, 50 et 75% des œufs selon les températures hivernales. Elles ont une influence sur la dynamique de développement de *S. titanus*, estimées d'après Chucho (2010).**

Stade	Pourcentage d'éclosion		Jours passés à 5°C			
			≤ 10	10 à 24	24 à 57	≥ 57
			Degrés-jours (DJ)			
L1	25%		320	300	255	230
	50%		460	460	390	300
	75%		585	645	585	355
	100%		1290	965	1150	715
	Œuf à L1	195				
L2	L1 à L2	50				
L3	L2 à L3	115				
L4	L3 à L4	140				
L5	L4 à L5	145				
Adulte	L5 à adulte	175				
Accouplement		115				
Première ponte		100				

sultats obtenus à partir de Jermini *et al.* (2015) qui ont été utilisés comme nombre de jours post-adulte pour atteindre l'accouplement, puis la première ponte, convertis en DJ (Eq. 1). Enfin, le nombre de jours minimal pour que *S. titanus* soit infectieux est fixé à 30 jours après éclosion, selon Schvester *et al.* (1969), cité par plusieurs auteurs dont Mazzoni *et al.* (2009) et Bressan *et al.* (2006) (tabl. 2).

A ces DJ s'ajoutent des températures létales ( $T_{let}$ ): 40°C pendant trois heures tuera 50% des adultes et larves (Rigamonti *et al.* 2011) ou 28°C pendant six heures pour les œufs (Rigamonti *et al.* 2014). La fécondité s'exprime en nombre d'œufs potentiels (O) et est fonction de la température diurne de 8 h à 18 h ( $T_{fec}$ ) selon Rigamonti *et al.* (2017) (fig. 1):

$$O = -0,7019 T_{fec}^2 + 30,2693 T_{fec} - 276,1067 \quad (2)$$

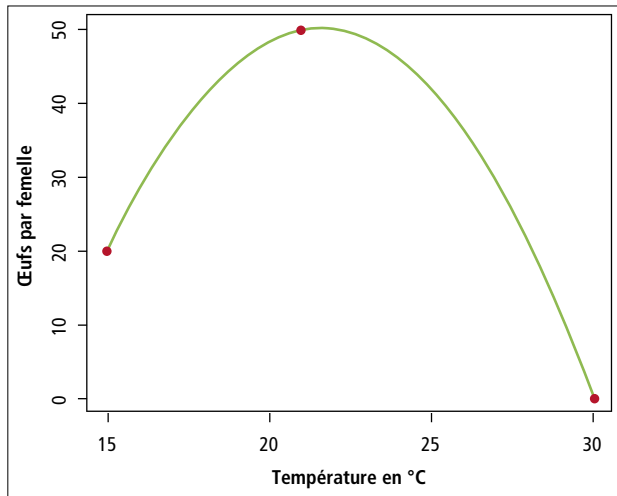
### Croisement des données

Les températures émuloées ont été croisées avec les informations issues des modèles de développement de *S. titanus* (fig. 2). Cela a permis de déterminer le nombre d'œufs potentiels par femelles. Une comparaison avec des observations en vignobles a validé l'émulation. L'applicabilité de la méthode des deltas à des températures horaires a également été vérifiée. Le modèle a été validé par confrontation avec les relevés de populations provenant de la littérature (Linder et Jermini 2007). Cela a également permis de déterminer différents seuils de fécondité (= nombre d'œufs médian par femelle) pour un lieu géographique: «pas adapté» =  $\leq 10$ ; «adapté» = entre 10 et 40 et «très adapté» =  $\geq 40$ .

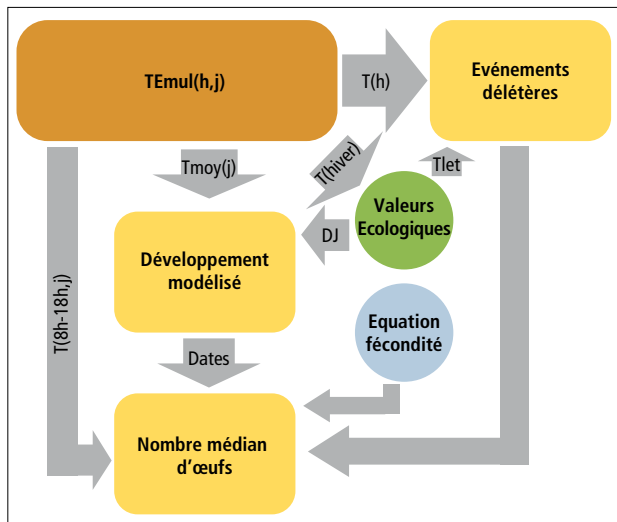
## Résultats et discussion

### Fécondité potentielle de *S. titanus*

Dans les conditions actuelles (Historique) (fig. 3), le Tessin est la seule région très adaptée (env. 43 œufs). Les vignobles de Satigny (env. 33,5 œufs) et Changins (35 œufs) ainsi que Lutry et Châteauneuf (respectivement env. 38 et 39,5 œufs) sont adaptés. Cressier (24 œufs) et les régions de plus haute altitude telles que Tsâlin (7,5 œufs) ne sont pour l'instant pas adaptées. Lors d'étés caniculaires, comme en 2003, le phénomène inverse s'observe; le nombre d'œufs médian par femelle était plus important pour les vignobles en haute altitude (plus de 30) et au nord (env. 25). Au contraire, dans tous les autres vignobles, à l'exception de Lutry (env. 40), il a été inférieur à la plupart des autres années: < 10 à Satigny, environ 20 à Contone, 30 à Châteauneuf et 12 à Changins.



**Figure 1** | Courbe de fécondité exprimée en œufs par femelle selon la température, issue de l'Eq. 2, basée sur les données de Rigamonti *et al.* (2017) matérialisées par les points rouges. La paramétrisation, ici quadratique, est décrite par la courbe verte. Par conséquent, la fécondité est optimale pour une température de 21,6°C et diminue si les températures sont supérieures ou inférieures à cette dernière.



**Figure 2** | Fonctionnement du modèle de développement de *S. titanus*, avec  $T_{Emul}$  la température horaire future émuloée (période 2050-2087 ou 2070-2107, selon le scénario), l'heure  $h$ , le jour  $j$  et mois  $m$ .  $T$  indique la température et hiver la période hivernale allant du 1<sup>er</sup> janvier à 63 jours après (Chuche 2010). Le développement modélisé se fonde sur le croisement des températures horaires et des degrés-jours, selon Bloesch et De Siebenthal (1988). Il permet de déterminer les dates d'apparition des stades (L1 à première ponte) de *S. titanus*. Les températures horaires journalières correspondant à ces dates ( $T_{8h-18h,j}$ ), croisées avec les événements délétères et l'équation de fécondité (cf. Eq. 2 et fig. 1), fournissent un nombre d'œufs médian par femelle.

Cela concorde avec l'hypothèse avancée par Chuche et Thiéry (2009), selon laquelle la limitation de la distribution géographique de *S. titanus* dans les régions nordiques (latitude vs altitude) est due à son incapacité à effectuer un cycle de vie complet. Cela correspond aussi avec la distribution suisse actuelle de *S. titanus*, à savoir qu'il n'a pas été observé dans les vignobles de Cressier et Tsâlin, alors qu'il est présent à Genève depuis 1996 (Linder et Jermini 2007) et largement distribué dans la plaine du Rhône (Linder et Jermini 2007). Notre modèle (fig. 2) indique une moyenne de 33,5 œufs par femelle à Satigny et de 43 à Contone, ce qui est corroboré par les observations de population sur le terrain: env. six fois plus en 2006 (Linder et Jermini 2007). Il est à noter que le modèle ne tient pas compte d'autres variables (prédation, pratiques culturelles, etc.), qui pourraient influencer ce rapport. Ces résultats soutiennent le choix de l'Eq. 2, représentant une paramétrisation possible du modèle de développement de *S. titanus* (fig. 1). Cette paramétrisation implique aussi que les épisodes prolongés de températures élevées ont également un impact sur la survie de la population de *S. titanus*. Ils lui permettraient en effet de mieux se développer dans les régions normalement peu ou pas adaptées, avec plus de 20 œufs à Tsâlin, et plus de 10 à Cressier (comparé aux années précédentes). Au contraire, ils lui portent préjudice dans les zones généralement moyennement ou très adaptées (par exemple: Satigny et Contone, baisse d'environ 20 œufs). Le cas du vignoble de Lutry est particulier, car l'année 2003 ne se démarque pas des autres valeurs médianes (env. 40 œufs), contrairement à l'ensemble des autres vignobles. Lutry subirait un effet de modérateur thermique venant du Léman (Marshak 2010). Son influence était probablement en cause, tamponnant les variations de températures, ce qui aurait permis le maintien de la fécondité de *S. titanus* (nombre d'œufs par femelle) et la survie d'un nombre supérieur d'œufs.

Selon la simulation RCP2,6 pour la période 2050–2087 (fig. 3), la situation est semblable à la période actuelle pour les vignobles de Contone: 42,5 œufs; Tsâlin: 5 œufs. Elle devient plus adaptée pour Satigny: 38 œufs; Changins: 39 œufs; Cressier: 32 œufs avec une importante variabilité interannuelle. Enfin, Châteauneuf et Lutry deviennent très adaptés, avec 40,5 et 41,5 œufs. A l'horizon 2070–2107 (fig. 3, 2070 RCP2,6), la situation diffère peu de celle décrite au RCP2,6 2050, et reste plus favorable à *S. titanus* que la période actuelle.

En accord avec l'augmentation modérée des températures, le scénario RCP2,6 aura un impact favorable

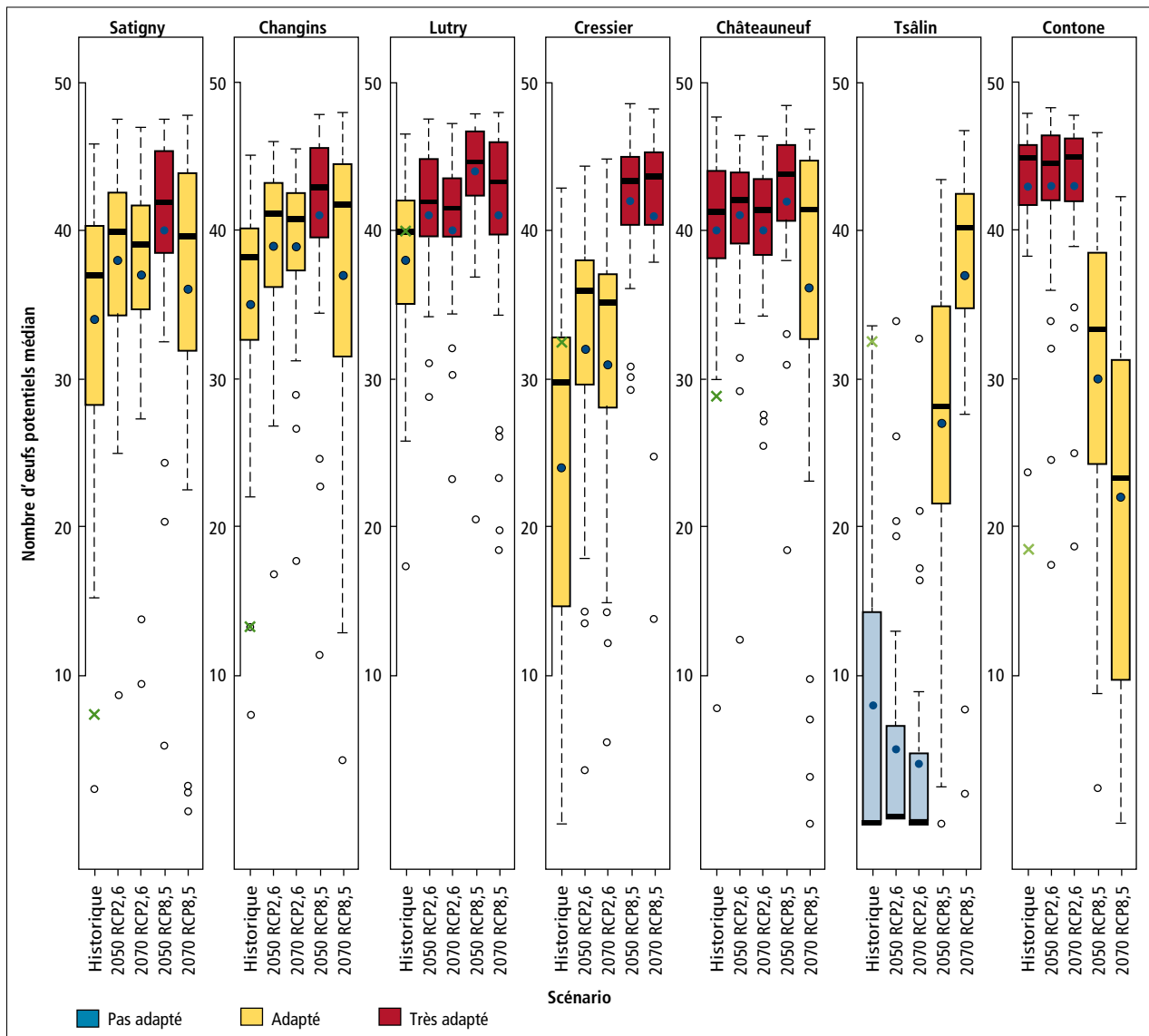
sur les populations de *S. titanus*. Son développement sera favorisé dans la plupart des vignobles, les rendant autant adaptés que l'est le Tessin actuellement. Les régions nordiques seront plus adaptées. Cela devrait favoriser une extension de la distribution de *S. titanus*, s'il atteint ces vignobles par le transport de matériel végétal ou des épisodes de forts vents (Chuche et Thiéry 2014).

Selon la simulation RCP8,5 pour la période 2050–2087 (fig. 3), le réchauffement rend la situation favorable pour le développement de *S. titanus* dans tous les vignobles sauf celui de Contone. Ainsi, Lutry, Changins, Satigny et Châteauneuf atteignent respectivement 43,5, 41, 40 et 42 œufs, soit autant que Contone actuellement. Tsâlin devient adapté, avec 27 œufs. De plus, la variabilité interannuelle y est importante et la situation semblable à celle de Cressier actuellement. Cressier atteint 41,5 œufs et sera plus adapté que Lutry actuellement. Au contraire, à Contone, la situation devient plus défavorable: 30 œufs, avec une importante variabilité interannuelle.

A l'horizon 2070–2107, RCP8,5 (fig. 3), Cressier devient très adapté avec 41,5 œufs. Lutry l'est également (40,5 œufs), avec une faible variabilité interannuelle. Tsâlin atteint 37,5 œufs, affichant une faible tendance positive. La situation y est semblable à celle de Lutry actuellement. La situation devient négative pour Satigny comme pour Châteauneuf, avec respectivement 35,5 et 39,5 œufs, avec une importante variabilité interannuelle. Changins devient adapté avec une importante variabilité interannuelle. Pour terminer, à Contone, la situation devient très défavorable: 21,5 œufs, avec une importante variabilité interannuelle.

Le réchauffement climatique en Suisse tel que simulé par le scénario RCP8,5 impliquerait un chamboulement des zones adaptées à la survie d'une population de *S. titanus* (fig. 3). Il y aurait une transition des zones les plus adaptées vers le nord et en altitude du fait de la possibilité d'effectuer un cycle de vie complet pour une plus importante part de la population. Plus au sud (Tessin et Genève), la distribution de *S. titanus* sera potentiellement contrainte par des températures généralement trop élevées, limitant la fécondité des femelles. Même si quelques œufs pourraient ne pas se développer du fait des températures supérieures à 28°C ( $T_{let}$  pour les œufs), il apparaît que dans tous les cas c'est la fécondité des femelles qui implique le faible nombre d'œufs médian, et non la mort des œufs. Des résultats similaires ont été obtenus pour *Hypothenemus hampei*, insecte à répartition pantropicale et ravageur du caféier. Le réchauffement climatique actuel lui





**Figure 3** | Boxplots illustrant le nombre d'œufs potentiels médian par femelle annuel selon les vignobles, selon le scénario: Historique, période actuelle; RCP2,6, réduction des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050; RCP8,5 scénario d'augmentation de ces émissions. Selon la période: horizons 2050 et 2070. La croix verte représente l'année 2003, le trait gras noir la médiane, le point bleu la moyenne, les points vides les valeurs extérieures, l'extrémité inférieure du rectangle représente le premier quartile (Q1) et l'extrémité supérieure le troisième quartile (Q3). Hors valeurs extérieures, les bornes extérieures des boxplots représentent les données comprises entre  $Q1+1,5 \times IQ$  et  $Q3+1,5 \times IQ$ , avec  $IQ$  l'intervalle interquartile. Ces intervalles donnent un aperçu de la variabilité interannuelle.

a permis d'étendre sa répartition dans des zones auparavant trop froides pour qu'il accomplisse un cycle de vie, mais des températures trop élevées (32°C) ne sont pas non plus adaptées à son développement (Jaramillo *et al.* 2009). Zhang *et al.* (2015) rapportent également que, pour la teigne des crucifères (*Plutella xylostella*, à répartition mondiale), des périodes de stress thermique durant le stade adulte peuvent réduire la durée de vie de l'insecte et diminuer le nombre d'œufs pondus par jour et leur proportion. Il en résulterait une baisse de la fécondité des individus. Leur travail met

également en évidence l'importance des stress thermiques subis par l'insecte au cours des différents stades de son développement: les conséquences en sont complexes, la capacité des individus à engendrer une descendance viable étant parfois favorisée et parfois non. Cet aspect n'a pas été pris en compte dans le modèle développé dans cette étude, faute de données disponibles dans la littérature.

Le Léman pourrait ne pas suffire à tamponner les températures élevées lors d'épisodes caniculaires prolongés. En effet, lors des périodes de fortes chaleurs, >

comme en 2003, la stabilité thermique des eaux de surface et leur température sont supérieures à la normale (Perroud et Goyette 2010). Il en a résulté un moindre transfert de chaleur durant les «heures chaudes» par convection des couches supérieures vers les couches en profondeur (Jankowski *et al.* 2006), en plus d'un transfert plus important de chaleur de l'eau à l'atmosphère durant les «heures fraîches» du jour (Marshak 2010). Ainsi, les épisodes de fortes chaleurs, en empêchant une baisse des températures pendant la nuit, risquent de porter préjudice aux populations de *S. titanus* en place. Néanmoins, *S. titanus* devrait pouvoir s'y maintenir en densité importante, contrairement à des régions telles que Satigny, où la variabilité interannuelle sera très marquée et les températures moins tamponnées, car Satigny est plus éloigné du lac. C'est également à Satigny que la seule occurrence d'un épisode atteignant le seuil délétère pour 50% de la population adulte, tel que fixé dans le modèle (3 h à 40°C, fig. 2) a été émulée (année 2103, RCP8,5).

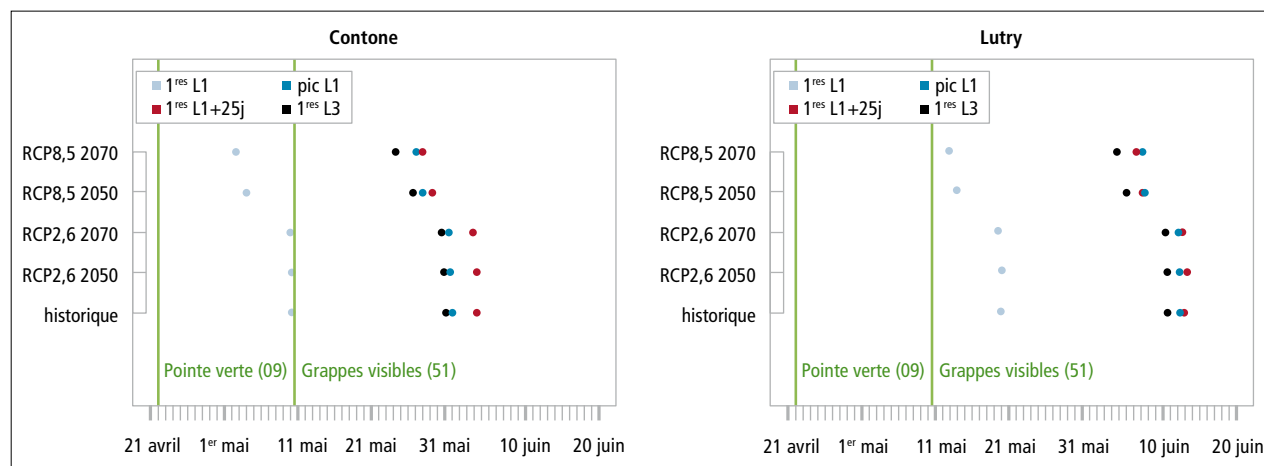
Une transition des aires de distribution de *S. titanus* à la fois vers les plus hautes latitudes et altitudes serait à prévoir. Considérant une distance d'environ 60 km entre la latitude de l'arc lémanique et celle de Cressier, ainsi qu'une différence d'altitude d'environ 400 m entre Châteauneuf et Tsâlin, les résultats concordent avec les estimations de Parmesan et Yohe (2003). Ces derniers suggèrent que le réchauffement climatique actuel induit un déplacement de 6,1 km vers le nord et 6,1 m en altitude par année en moyenne pour, entre autres, des papillons. Cette tendance a également été observée chez plusieurs espèces

d'*Heteroptera spp.* (Dmitry 2007), et chez certaines espèces de cicadelles (Biedermann *et al.* 2005). Cela serait en partie imputable à une mortalité plus importante des œufs, à la suite d'hivers plus doux. Il semble toutefois qu'il soit difficile de prévoir avec certitude la distribution des cicadelles suite au réchauffement climatique compte tenu de la nature complexe des interactions trophiques et abiotiques, mais celui-ci risque de leur porter préjudice (Biedermann *et al.* 2005).

### Cycle de vie

Un réchauffement climatique modéré (RCP2,6) n'aura pas d'impact significatif sur la dynamique (succession des stades) de population de *S. titanus*, même à l'horizon 2070. Selon le scénario RCP8,5, les populations pourront toujours se reproduire dans des lieux où *S. titanus* est déjà installé. Les éclosions y débiteront 6 à 8 jours plus tôt et les premiers individus du troisième stade de développement seraient 6 à 7 jours plus précoces. La durée d'éclosion serait rallongée de 2 jours (fig. 4).

Cela risquerait d'avoir un impact direct sur la gestion de *S. titanus* en cas de nécessité de traitement insecticide (de synthèse ou biologique). Il pourrait être plus difficile de toucher autant d'individus avec les mêmes traitements qu'actuellement. Il y aurait également un risque que l'application d'insecticide ne puisse plus être réalisée en combinaison avec d'autres interventions sur le vignoble, car la dynamique de population serait différente et il y aurait un décalage des stades vis-à-vis de la phénologie de *V. vinifera*. Les viti-



**Figure 4** | Dynamique d'éclosion des premières larves (L1) et de développement de *S. titanus* selon les scénarios, à Contone et Lutry. Le choix de représentation des L1, des L3 et des 25 jours ajoutés aux L1 correspond à la stratégie de lutte insecticide utilisée actuellement, le premier traitement des vignobles intervenant ± trois semaines après l'observation des premières L1. Lignes vertes = stades phénologiques de la vigne (Bloesch et Viret 2008).

culteurs devront donc optimiser les traitements (comm. pers. Linder, téléphone du 22.07.18) du fait de leur coût temporel et économique.

*S. titanus* pourrait, du fait de cette dynamique et de l'impact du réchauffement climatique sur la phénologie de *V. vinifera*, avoir des difficultés à survivre s'il n'est plus assez synchronisé avec le développement de sa plante hôte, particulièrement au Tessin: la sortie de la dormance de *V. vinifera* ne semble pas affectée par le changement climatique (Bloesch *et al.* 2009), et les premiers individus éclos à Contone (3 mai) apparaissent après la pointe verte (23 avril), 8 jours plus tôt en comparaison de la période actuelle. Ces éclosions auraient lieu avant que les feuilles et rameaux, dont les larves ont besoin pour se nourrir, ne soient apparus. Or l'asynchronisme de certaines espèces d'insectes (phalène brumeuse *Operophtera brumata*) par rapport à leur plante hôte pourrait leur nuire du fait d'une mortalité larvaire plus importante (Cannon 1998). Malgré une accélération de la phénologie de *V. vinifera*, il semble peu probable que les adultes *S. titanus* soient affectés par sa sénescence précoce, puisqu'il est polyphage (Trivellone *et al.* 2016).

### Seconde génération

Seul le scénario RCP8,5 permettrait une seconde génération à l'horizon 2050 (tabl. 3): à Lutry et Contone, et dans presque tous à l'horizon 2070: Satigny, Changins, Châteauneuf, Lutry et Contone. A l'horizon 2070, aucun site ne permettrait de produire suffisamment d'œufs pour avoir une seconde génération viable, excepté à Contone (18 œufs). En effet, les individus ne parviennent pas à pondre.

Cette seconde génération est hypothétique car, selon le modèle (fig. 2), les individus éclos seraient issus de la ponte des premiers 25% de la génération précédente. Compte tenu de leur nombre, leur impact serait modéré. Dans des régions telles que le Tessin, qui devraient ne pas être adaptées à l'horizon 2100, la bivoltinité de *S. titanus* compromettrait davantage

le maintien d'une population. En revanche, les concentrations de *Candidatus phytoplasma vitis* dans le phloème de *V. vinifera* étant plus élevées en fin de saison (Bressan *et al.* 2006), les adultes *S. titanus* pourraient induire une seconde transmission. De plus, il n'existe à l'heure actuelle qu'une seule mention d'une éventuelle bivoltinité de *S. titanus*, dans l'Aude (France) (Chuche et Thiéry 2014). Même s'il paraît peu probable que *S. titanus* puisse à l'avenir être bivoltin chaque année, Masters *et al.* (1998) avancent que certaines espèces de cicadelles (*Auchenorrhyncha spp.*) sont en mesure de produire des générations supplémentaires, particulièrement celles qui sont déjà bi- ou multivoltines. De plus, des tests effectués sur une punaise (*Graphosoma lineatum*) indiquent que, dans des conditions climatiques plus chaudes, cet insecte univoltin sans diapause obligatoire peut devenir bivoltin (Musolin et Saulich 2001).

**Tableau 3 | Degré d'adaptation des vignobles à une seconde génération de *S. titanus*, selon les scénarios envisagés (bleu: pas adapté; jaune: adapté; rouge: très adapté).**

Scénario RCP	Satigny	Changins	Lutry	Cressier	Châteauneuf	Tsâlin	Contone
Historique							
2,6 2050							
2,6 2070							
8,5 2050							
8,5 2070							



## Conclusions

Ce projet a étudié l'impact en Suisse de deux scénarios de réchauffement climatique sur la cicadelle *S. titanus*, vecteur reconnu de la flavescence dorée, et il a mis en évidence certains éléments.

- Actuellement, des épisodes caniculaires pourraient favoriser sa survie au nord et en altitude et lui porter préjudice ailleurs.
- Selon le scénario RCP2,6 (réduction des émissions de gaz à effet de serre à partir de 2050), la situation devrait rester similaire à ce que l'on observe actuellement.
- Selon le scénario RCP8,5 (augmentation des émissions de gaz à effet de serre), il devrait y avoir une extension de la distribution de *S. titanus* vers le nord et en altitude. Plus au sud, la distribution sera limitée par des températures plus élevées, qui auront un impact négatif sur la fécondité des femelles. Les éclosions seront avancées de près d'une semaine à l'horizon 2070. Cela impliquerait une précocité des traitements insecticides.
- Le scénario RCP8,5 permettrait à *S. titanus* de produire une hypothétique seconde génération. Celle-ci pourrait occasionner une seconde vague d'infection, surtout au Tessin à l'horizon 2070.
- Dans les deux scénarios analysés, *S. titanus* devrait rester un vecteur viable de la flavescence dorée.
- Ces projections soutiennent une poursuite des efforts de lutte engagés actuellement, ainsi que la nécessité d'approfondir les connaissances scientifiques sur *S. titanus* et *Candidatus phytoplasma vitis*.

### Remerciements

Les auteurs remercient vivement Christian Linder et Michel Jeanrenaud pour leurs conseils et les données fournies, ainsi que Léna Voisin et Camilla Mina pour leur relecture du manuscrit.

### Bibliographie

- Beniston M., Stephenson D. B., Christensen O. B., Ferro C. A. T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T. & Woth K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* **81** (1), 71–95.
- Biedermann R., Achtziger R., Nickel H. & Stewart A. J., 2005. Conservation of Grassland Leafhoppers: A Brief Review. *Journal of Insect Conservation* **9** (4), 229–243.
- Bloesch B. & De Siebenthal J., 1988. La température en tant que moyen de prévision et d'avertissement dans la lutte contre les insectes. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **20** (2), 121–126.
- Bloesch B. & Viret O., 2008. Stades phénologiques repères de la vigne. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **40** (6), 4.
- Bloesch B., Viret O., Fabre A.-L. & Spring J.-L., 2009. Evolution climatique et phénologie de la vigne de 1958 à nos jours. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **41** (3), 143–149.
- Bonfils J. & Schvester D., 1960. Les cicadelles (Homoptera *Auchenorrhyncha*) dans leurs rapports avec la vigne dans le Sud-Ouest de la France. *Ann Epiphyt* **3**, 325–336
- Bressan A., Larrue J. & Padieu E. B., 2006. Patterns of phytoplasma-infected and infective *Scaphoideus titanus* leafhoppers in vineyards with high incidence of Flavescence dorée. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **119** (1), 61–69.
- Cannon R. J., 1998. The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology* **4** (7), 785–796.
- Chucho J., 2010. Comportement de *Scaphoideus titanus*, conséquences spatiales et démographiques, Thèse n°1771, Université Bordeaux 2, 216p.
- Chucho J. & Thiéry D., 2014. Biology and ecology of the Flavescence dorée vector *Scaphoideus titanus*: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **34** (2), 381–403.
- Dmitry L. M., 2007. Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (*Heteroptera*) to climate change. *Global Change Biology* **13**(8), 1565–1585.
- Falzoi S., Lessio F., Spanna F. & Alma A., 2014. Influence of temperature on the embryonic and post-embryonic development of *Scaphoideus titanus* (Hemiptera: *Cicadellidae*), vector of grapevine Flavescence dorée. *International Journal of Pest Management* **60** (4), 246–257.
- GIEC, 2014. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contributions des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. *Technical report*, GIEC, Genève, Suisse.
- IRPCM, 2004. *Candidatus phytoplasma*, a taxon for the wall-less, nonhelical prokaryotes that colonize plant phloem and insect. *Int. J. System. Evol. Microbiol.* **54**, 1243–1255.
- Jaramillo J., Chabi-Olaye A., Kamonjo C., Jaramillo A., Vega F. E., Poehling H.-M. & Borgemeister C., 2009. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLOS ONE* **4** (8), 1–11.
- Jaworski T. & Hilszczanski J., 2013. The effect of temperature and humidity changes on insect's development their impact on forest ecosystems in the expected climate change. *Forest Research Papers* **74** (4), 345.
- Linder C., Kehrl P., Bünter M. & Blaser S., 2019. Actualités viticoles: Le vecteur de la flavescence dorée *Scaphoideus titanus* en Suisse. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **51** (1): 60-61.
- Linder C. & Jermini M., 2007. Biologie et distribution du vecteur de la flavescence dorée dans les vignobles. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture* **96**, 97–101.
- Jermini M., Morisoli R., Rigamonti I. E., Girgenti P. & Mazzoni V., 2015. Fertility, longevity, oviposition dynamic and sex-ratio of *Scaphoideus titanus* Ball. In: IOBC-WPRS Conference of the Working Group on "Integrated Protection and Production in Viticulture", 20-23 October, Vienne, Autriche.

- Marshak S., 2010. *Earth, portrait of a planet*, 3ed, De Boeck, Bruxelles, 880 p.
- Masters G. J., Brown V. K., Clarke I. P., Whittaker J. B. & Hollier J. A., 1998. Direct and indirect effects of climate change on insect herbivores: *Auchenorrhyncha* (Homoptera). *Ecological Entomology* **23** (1), 45–52.
- Mazzoni V., Pröser J., Lucchi A. & Virant-Doberlet M., 2009. Reproductive strategy of the Nearctic leafhopper *Scaphoideus titanus* Ball (Hemiptera: Cicadellidae). *Bulletin of Entomological Research*, **99** (4), 401–413.
- Musolin D. & Saulich A., 2001. Environmental control of voltinism of the stinkbug *Graphosoma lineatum* in the forest-steppe zone (Heteroptera: Pentatomidae). *Entomologia Generalis* **25** (4), 255–264.
- OcCC (Organe consultatif sur les changements climatiques), 2007. Les changements climatiques et la Suisse en 2050. *Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*. SCNAT-PROCLIM, Berne, 168 pp.
- OPV, Conseil fédéral Suisse 2010. Ordonnance sur la protection des végétaux. Adresse: <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilations/20101847/201801010000/916.20.pdf> [20.04.18].
- Papura D., Delmotte F., Giresse X., Salar P., Danet J.-L., van Helden M., Foissac X. & Malembic-Maher S., 2009. Comparing the spatial genetic structures of the Flavescence dorée phytoplasma and its leafhopper vector *Scaphoideus titanus*. *Infect. Genet. Evol.* **9**, 867–876.
- Parmesan C. & Yohe G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**, 37.
- Perroud M. & Goyette S., 2010. Impact of warmer climate on Lake Geneva water-temperature profiles. *Boreal Environment Research*, **15**, 255–278.
- Rigamonti I. E., Jermini M., Fuog D. & Baumgartner J., 2011. Towards an improved understanding of the dynamics of vineyard-infesting *Scaphoideus titanus* leafhopper populations for better timing of management activities. *Pest Management Science* **67** (10), 1222–1229.
- Rigamonti I. E., Trivellone V., Jermini M., Fuog D. & Baumgärtner J., 2014. Multiannual infestation patterns of grapevine plant inhabiting *Scaphoideus titanus* (Hemiptera: Cicadellidae) leafhoppers. *The Canadian Entomologist* **146** (1), 67–79.
- Rigamonti I. E., Girgenti P. & Jermini M., 2017. Longevity and reproductive profile of *Scaphoideus titanus* Ball adults reared under controlled conditions. In: Proceedings of Meeting of the IOBC-WPRS Working Group "Integrated protection in viticulture", *Riva del Garda* **18-20.10.2017**, 302.
- Ruiter A., 2012. Delta-change approach for CMIP5 GCMs, <http://bibliotheek.knmi.nl/stageverslagen/traineereportRuiter.pdf> [07.08.17]
- Schaerer S., Johnston S., Gugerli P. & Linder C., 2007. Flavescence dorée in Switzerland: spread of the disease in canton of Ticino and of its insect vector, now also in cantons of Vaud and Geneva. *Bulletin of insectology* **60** (2), 375–376.
- Schaerer S. & Linder C., 2017. Flavescence dorée et son vecteur au nord des Alpes, <http://www.vitiplus.ch=document=617%20EXP%2000R%20Pr%C3%A9sentation%20Flavescence%20S.%20Sch%C3%A4rer%20et%20Ch.%20Linder.pdf> [28.02.18]
- Schaub L. & Linder C., 2007. Surveillance nationale du vecteur de la flavescence dorée en 2006. *Revue suisse Viticulture, Arboriculture et Horticulture* **39** (2), 95–96.
- Schvester D., Carle P. & Moutous G., 1961. Sur la transmission de la flavescence dorée des vignes par une cicadelle. *C.R. Acad. Agric. Fr.* **47**, 1021–1024.
- Schvester D., Carle P. & Moutous G., 1969. Nouvelles données sur la transmission de la flavescence dorée de la vigne par *Scaphoideus littoralis* Ball. *Annales de zoologie et d'écologie animale* **1**, 445–465.
- Trivellone V., Filippin L., Narduzzi-Wicht B. & Angelini E., 2016. A regional-scale survey to define the known and potential vectors of grapevine yellow phytoplasmas in vineyards South of Swiss Alps. *European Journal of Plant Pathology* **145** (4), 915–927.
- Zhang W., Rudolf V. H. W. & Ma C.-S., 2015. Stage-specific heat effects: timing and duration of heat waves alter demographic rates of a global insect pest. *Oecologia*, **179**, 947-957.



**Summary****Influence of climate warming on the population dynamics of *Scaphoideus titanus* in French-speaking Switzerland**

The leafhopper *Scaphoideus titanus* is the vector of Flavescence dorée of grapevine, a serious phytoplasma disease. The potential distribution of *S. titanus*, its life cycle and the possibility of a second generation have been estimated by 2050 and 2070. Two warming scenarios were chosen, namely an optimistic (RCP2,6) and a pessimistic (RCP8,5) greenhouse gas forcing from 2050 onwards. The ecological life cycle values of *S. titanus* were cross-referenced with temperature emulation using the delta method. According to these warming scenarios, its distribution should extend to the North and to high altitude, while remaining in the regions where it is already established. Hatching would be earlier and more extended. By 2070 (RCP8,5), interannual climate variability could threaten populations. Eventually, Ticino would become less and less suitable for survival. The RCP8,5 scenario would produce a hypothetical second generation.

**Key words:** *Scaphoideus titanus*, climate change, Flavescence dorée, bivoltine, delta method.

**Zusammenfassung****Einfluss der globalen Erwärmung auf die Populationsdynamik von *Scaphoideus titanus* in der Westschweiz**

Der Blatthüpfer *Scaphoideus titanus* ist der Vektor der Goldregen bei Reben, einer schweren Phytoplasmen-erkrankung. Die potenzielle Verteilung des *S. titanus*, sein Lebenszyklus und die Möglichkeit einer zweiten Generation wurden bis 2050 und 2070 geschätzt. Es wurden zwei Erwärmungsszenarien gewählt: Reduzierung (RCP2,6) und Erhöhung (RCP8,5) der Treibhausgasemissionen ab 2050. Die ökologischen Lebenszykluswerte von *S. titanus* wurden mit der Temperaturemulation nach der Delta-Methode zusammengeführt. Gemäß den Szenarien RCP2,6 und RCP8,5 sollte sich die Verteilung nach Norden und in große Höhen erstrecken und gleichzeitig in den Regionen verbleiben, in denen sie bereits etabliert ist. Die Schlüpflinge würden früher und weiter verbreitet sein. Bis 2070 (RCP8,5) könnte eine zwischenjährige Variabilität der Wetterbedingungen das Überleben der Populationen gefährden. Schliesslich würde das Tessin immer weniger geeignet werden. Das RCP8,5-Szenario würde eine hypothetische zweite Generation ergeben.

**Riassunto****Influenza del riscaldamento globale sulla dinamica demografica di *Scaphoideus titanus* nella Svizzera romanda**

La cicalina *Scaphoideus titanus* è il vettore della flavescenza dorata nella vite, una grave malattia da fitoplasma. La distribuzione potenziale di *S. titanus*, il suo ciclo di vita e la possibilità di una seconda generazione sono stati stimati tra il 2050 e il 2070. Sono stati scelti due scenari di riscaldamento: riduzione (RCP2,6) e aumento (RCP8,5) delle emissioni di gas serra a partire dal 2050. I valori del ciclo di vita ecologico di *S. titanus* sono stati incrociati con l'emulazione della temperatura secondo il metodo delta. Secondo gli scenari RCP2,6 e RCP8,5, la sua distribuzione dovrebbe estendersi a nord e in alta quota, pur rimanendo nelle regioni in cui è già insediato. La schiusura delle uova sarebbe più precoce e scalare. Entro il 2070 (RCP8,5), la variabilità interannuale delle condizioni meteorologiche potrebbe minacciare la sopravvivenza delle popolazioni. Alla fine, il Ticino diventerebbe sempre meno adatto. Lo scenario RCP8,5 permetterebbe la formazione di un'ipotetica seconda generazione.