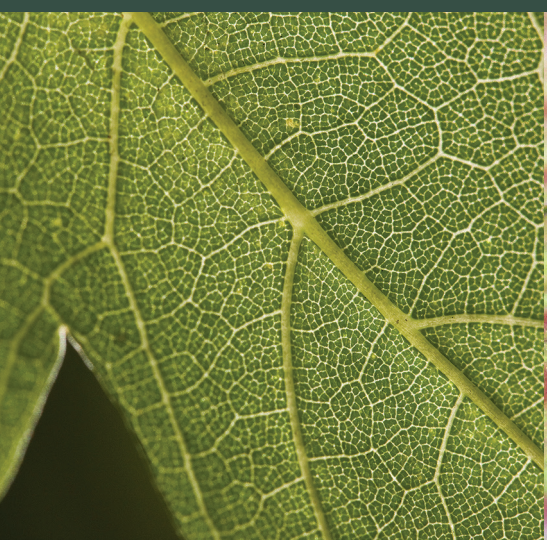


Impact différentiel du réchauffement climatique sur les insectes ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels : implications en agriculture



RÉDACTION

Joffrey Moiroux, Ph.D., biologiste, Université de Montréal.
Gaétan Bourgeois, Ph.D., bioclimatologiste, AAC
Guy Boivin, Ph.D., biologiste, AAC
Jacques Brodeur, Ph.D., biologiste, Université de Montréal.

COLLABORATION ET RÉVISION

Anne Blondlot, agronome, Impacts et Adaptation, Ouranos.
Conrad Cloutier, Ph.D., biologiste, Université Laval.
Daniel Cormier, Ph.D., entomologiste, IRDA.
Josée Doyon, professionnelle de recherche, Université de Montréal.
Annabelle Firlej, Ph.D., biologiste, IRDA.
Annie-Ève Gagnon, Ph.D., biologiste, CEROM.
Patrick Grenier, Ph.D., climatologue, Ouranos.
Christian Hébert, Ph.D., biologiste, Ressources naturelles Canada.
Michel Lacroix, agronome, MAPAQ.
Jean-Philippe Légaré, M.Sc., biologiste, MAPAQ.

COMMENT CITER CE DOCUMENT

Moiroux J., G. Bourgeois, G. Boivin et J. Brodeur. 2014. *Impact différentiel du réchauffement climatique sur les insectes ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels : implications en agriculture*. Feuille technique Ouranos Projet 550005-103, Québec, Canada. 12 p.

Photographie

Page couverture: 1. Ken Gantz, Flickr (CC BY-NC-SA 2.0) / 2. & 7. Andrew Jensen, Flickr (CC BY-NC-SA 2.0) / 3. Fated Snowfox, Flickr (CC BY-NC 2.0) / 4. Mathieu Bélanger Morin / 5. Donald Hobern, Flickr (CC BY 2.0) / 6. Keith Weller / 8. Christie (fermicat), Flickr (CC BY-NC-SA 2.0) / 9. Rich Griffith, Flickr (CC BY-NC-SA 2.0)
Page 2: *Coleomegilla maculata*: Mathieu Bélanger Morin / *Macrosiphum euphorbiae*: Whitney Cranshaw (Wikimedia)
Page 3: *Ostrinia nubilalis*: Keith Weller (Wikimedia)
Page 4: *Acyrtosiphon pisum*: Shipher Wu (Wikimedia)



Les coûts relatifs aux travaux ont été assumés par Ouranos grâce au Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
EFFETS PHYSIOLOGIQUES	1
Synchronisme temporel et nombre annuel de générations	1
Aire de distribution	3
Reproduction	3
Réponses immunitaires des ravageurs	4
LES COMPORTEMENTS	4
Taux de prédation et de parasitisme	5
Diversité des ressources	5
Sex-ratio	5
Thermorégulation	5
LE POTENTIEL ADAPTATIF DES INSECTES	6
CE QU'IL FAUT RETENIR	7
RÉFÉRENCES	8

INTRODUCTION

Les arthropodes, parmi lesquels se retrouvent les insectes, les acariens et les araignées, sont des organismes poïkilothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle varie avec la température extérieure. En conséquence, leurs caractéristiques biologiques telles que la vitesse de développement, la taille, la longévité, la fécondité ou l'activité varient énormément avec la température ambiante. Les changements climatiques annoncés devraient donc avoir une profonde influence sur ces organismes.

De nombreuses études ont simulé l'influence d'une augmentation des températures sur la dynamique des populations de ravageurs des cultures. Bien souvent, on s'attend à ce que les dégâts causés aux plantes augmentent au cours des prochaines décennies au Québec, en raison d'une augmentation du nombre de générations, du taux de consommation des plantes et d'une émergence plus précoce des ravageurs (ex : pyrale du maïs et doryphore de la pomme de terre, voir Gagnon *et al.*, 2013; charançon de la carotte, voir Boivin, 1999). Néanmoins, la grande majorité de ces études ne concernent qu'un niveau trophique, les phytophages, alors que l'influence des changements climatiques sera bien plus complexe, les différentes espèces d'insectes et les différents niveaux trophiques interagissant entre eux.

La régulation naturelle des ravageurs de cultures par leurs ennemis naturels est un processus important en agriculture. En se nourrissant ou en parasitant des espèces nuisibles, les prédateurs et parasitoïdes¹ présents naturellement dans les systèmes agricoles ou ceux introduits dans le cadre de programmes de lutte biologique permettent de limiter les dégâts causés aux cultures. L'efficacité de ces ennemis naturels dépend de nombreux facteurs parmi lesquels le synchronisme entre leur cycle biologique et celui de leurs proies/hôtes, ainsi que leur capacité à les détecter et les exploiter. En cas d'effets différentiels de la température entre ravageurs et ennemis naturels, on peut s'attendre à des effets considérables pour l'agriculture. Les connaissances actuelles sont encore insuffisantes pour prédire avec exactitude quelles seront les conséquences des changements climatiques sur l'agriculture, et particulièrement sur la lutte biologique. Néanmoins, les quelques études publiées, dont celles

réalisées dans le cadre du projet Ouranos « *Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec* », nous permettent d'entrevoir les éventualités pour certains systèmes dans les années à venir.

Dans le présent document, nous décrivons successivement les effets potentiels d'un réchauffement climatique sur la physiologie et le comportement des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels, prédateurs et parasitoïdes, ainsi que les conséquences anticipées en lutte biologique.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES

SYNCHRONISME SAISONNIER ET NOMBRE ANNUEL DE GÉNÉRATIONS

Le synchronisme de la date d'émergence printanière et du nombre de générations entre ravageurs et ennemis naturels est un élément essentiel en lutte biologique. Un décalage entre les deux acteurs peut mener à une explosion du nombre de ravageurs, qui ne seront pas suffisamment régulés par les prédateurs et parasitoïdes. Pour étudier ce synchronisme et prédire les effets du réchauffement climatique, il faut en premier lieu s'intéresser à l'effet de la température sur le développement des arthropodes. Typiquement, leur vitesse de développement augmente avec la température jusqu'à atteindre un certain pic, qui correspond à la température optimale, puis diminue brusquement jusqu'à ce que le développement soit impossible (Figure 1). De cette courbe, on peut déduire différents paramètres thermiques importants à prendre en compte pour les arthropodes : leurs températures minimale (T_{base}) et maximale (T_{sup}) en-deça et au-delà desquelles ils ne peuvent pas se développer, leur température optimale pour laquelle la vitesse de développement est maximale (T_{dmax}), ainsi que leur cumul de degrés-jours, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour se développer.

1. parasitoïde : organisme qui se développe sur ou à l'intérieur d'un hôte, ce développement résultant inévitablement en la mort de l'hôte.

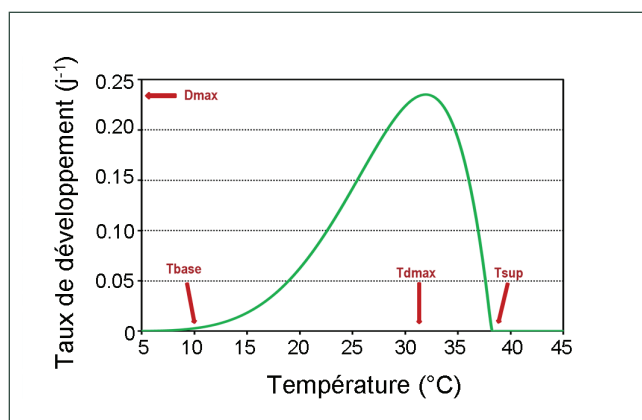


Fig. 1 : Courbe-type de la vitesse de développement en fonction de la température chez un arthropode. En dessous de T_{base} et au-dessus de T_{sup} , le développement est impossible. Au sommet du pic, à la température T_{dmax} , le développement est le plus rapide (D_{max}).

Ces différents paramètres permettent de déterminer la date d'émergence ou de reprise des activités dans les cultures et le nombre annuel de générations des arthropodes, qui dépendent essentiellement de la température minimale de développement et de la vitesse de développement. Chaque espèce, voire chaque population, présente une corrélation entre la température et son développement qui lui est spécifique. On estime que les ennemis naturels, particulièrement les espèces spécialistes, sont bien adaptés à leurs proies/hôtes quant à leur écologie saisonnière et leur réponse thermique. Si un décalage se produit entre la courbe de développement d'un phytophage et celle de son ennemi naturel, les conséquences en lutte biologique pourraient être importantes.

Prenons l'exemple d'un ravageur et de son prédateur : si la vitesse de développement augmente plus rapidement chez le ravageur que chez l'ennemi naturel lorsque la température augmente, alors plus la température sera élevée et plus l'écart de la vitesse de développement entre le ravageur et son ennemi naturel va s'accroître. Le synchronisme entre les deux pourrait alors être perdu, le ravageur étant actif plus tôt en saison et produisant plus de générations que son ennemi naturel.

Afin d'estimer quels sont les couples ravageurs-ennemis naturels chez qui le synchronisme pourrait être perdu, nous avons développé un indice de risque d'altération, basé sur la vitesse de développement des espèces en interaction (Brodeur *et al.* 2013). Lorsque cet

indice reste stable avec une augmentation de température, il n'y aura pas de perte de synchronisme. C'est par exemple le cas du couple puceron de la pomme de terre *Macrosiphum euphorbiae* et son parasitoïde *Aphidius ervi*, lesquels répondent de façon similaire aux températures. Lorsque l'indice de risque d'altération augmente, le ravageur sera défavorisé, car l'ennemi naturel se développera de plus en plus rapidement. On peut citer comme exemple le couple *M. euphorbiae* et son prédateur, la coccinelle maculée *Coleomegilla maculata*. Lorsque cet indice diminue, le ravageur se développera relativement plus vite que son ennemi naturel en cas de réchauffement climatique, créant un risque d'explosion du ravageur. Il s'agit par exemple du couple puceron du pommier *Aphis pomi* et son parasitoïde *A. ervi*. Ces prédictions supposent que le synchronisme entre ravageurs et



Macrosiphum euphorbiae



Coleomegilla maculata

plantes soit maintenu avec un réchauffement climatique. Tout effet de la température sur le synchronisme entre le ravageur et la plante modifiera les prédictions sur le synchronisme entre le ravageur et les ennemis naturels.

AIRE DE DISTRIBUTION En agriculture au Québec, une des craintes majeures associées au réchauffement climatique est l'arrivée dans les cultures depuis le sud de ravageurs qui bénéficieront de conditions thermiques favorables. On peut citer par exemple les cas de la pyrale du maïs bivoltine *Ostrinia nubilalis* ou de la légionnaire uniponctuée *Mythimna unipuncta* qui voient leur aire de distribution s'étendre vers les latitudes boréales en Amérique du Nord, vraisemblablement en raison de l'augmentation des températures. Les risques en agriculture découlent de deux facteurs. Tout d'abord, les pré-



Ostrinia nubilalis

dateurs et parasitoïdes spécifiques d'un hôte ne peuvent pas coloniser un nouveau milieu tant que leur hôte/proie n'est pas établi (van Nouhuys 2005). Ensuite, certains parasitoïdes et prédateurs ont des capacités de dispersion plus faibles que celles de leurs hôtes (Elzinga *et al.* 2007, Roland 1993), ce qui implique qu'ils mettront plus de temps à envahir une zone donnée et ne pourront pas limiter les populations de ravageurs dans les zones d'expansion. Ainsi, durant les premières années suivant l'introduction d'un ravageur, celui-ci pourra être plus ou moins libre de la régulation exercée par ses ennemis naturels plus au sud. Néanmoins, quelques études montrent que d'autres parasitoïdes présentent des taux de colonisation similaires à leur hôte, et sont donc

capables de les suivre en temps réel lorsque ceux-ci progressent sur un territoire (Dempster, Atkinson et French 1995; Elzinga *et al.* 2007).

Dans un scénario de réchauffement climatique au Québec, une approche intéressante pour la lutte biologique consisterait à prélever des prédateurs et parasitoïdes directement aux latitudes plus chaudes afin de les implanter dans les nouvelles conditions climatiques rencontrées, cela afin de répondre rapidement à l'établissement d'un nouveau ravageur. Ceci suppose néanmoins de s'intéresser dès maintenant aux ennemis naturels des ravageurs susceptibles de s'établir au Québec dans les prochaines années, en particulier à leur capacité de survie sous ces latitudes et aux effets qu'aurait leur présence sur les agro-écosystèmes québécois et leur biodiversité.

REPRODUCTION La taille et la fécondité des arthropodes varient également avec la température. En règle générale, plus la température de développement augmente et plus les arthropodes sont petits (Atkinson, 1994) et produisent moins d'œufs (Honk, 1993). Dans certains cas, l'influence de la température sur la fécondité est similaire entre le ravageur et son ennemi naturel, une augmentation de température n'aura alors pas de conséquences sur la lutte biologique puisque les deux niveaux trophiques seront affectés de la même façon. Il s'agit par exemple du cas du tétranyque à deux points *Tetranychus urticae* et son acarien prédateur *Phytoseiulus persimilis* (Vangansbeke *et al.* 2013). En revanche, il existe des exemples où la fécondité du prédateur/parasitoïde est affectée bien avant celle du ravageur, comme le couple puceron du melon *Aphis gossypii* et son parasitoïde *Aphidius matricariae* (Zamani *et al.* 2006). Les populations du ravageur peuvent alors se reproduire à des températures auxquelles leurs ennemis naturels ne produisent que peu de descendants. À l'inverse, la fécondité du ravageur peut chuter avant celle de ses ennemis naturels. C'est le cas du puceron de la pomme de terre qui connaît une très forte diminution du nombre de descendants pondus à 24°C, et qui n'en produit presque plus à 28°C, alors que la fécondité de son parasitoïde, *A. ervi*, reste importante à ces températures (Figure 2; Brodeur *et al.* 2013). Ici encore, il semble nécessaire d'étudier en détail chaque association ravageur-ennemi naturel susceptible d'affecter les cultures au Québec.

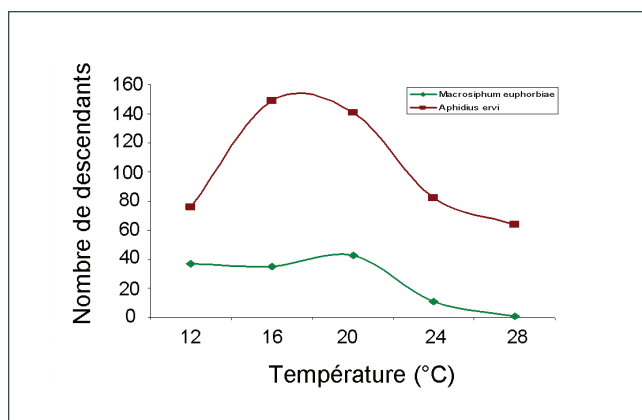


Fig. 2 : Nombre de descendants du puceron *Macrosiphum euphorbiae* et de son parasitoïde *Aphidius ervi* élevés à différentes températures.

On observe également que la reproduction est plus précoce chez les parasitoïdes lorsque la température augmente (Brodeur *et al.* 2013), comme prédit par divers modèles théoriques. En effet, les parasitoïdes émergent avec proportionnellement plus d'œufs matures à haute température, même si le nombre total d'œufs produits est plus faible qu'à basse température. Une augmentation de la température aura donc un double effet : négatif, car la fécondité totale des parasitoïdes diminuera et positif, car les femelles seront efficaces plus tôt dans leur vie et pourront réguler les ravageurs plus rapidement.

RÉPONSES IMMUNITAIRES DES RAVAGEURS Les températures extrêmes peuvent également interférer avec les mécanismes de défense d'un ravageur suite au parasitisme ou à une infection microbienne. Par exemple, à haute température le système immunitaire des pucerons et autres ravageurs est plus efficace à contrer le parasitisme (Thomas & Blandford 2003; Hance *et al.* 2007). De même, l'exposition aux températures extrêmes modifie la survie et la diversité des bactéries internes bénéfiques présentes chez les ennemis naturels (Pintureau *et al.* 1999; Guay *et al.* 2009). Ces bactéries influencent entre autres la tolérance au froid ou



Acyrthosiphon pisum

à la chaleur, la défense immunitaire et la fécondité chez les parasitoïdes. Zhou et Zhang (2009) ont démontré qu'un choc thermique entraîne l'élimination de la bactérie *Wolbachia* chez le parasitoïde *Encarsia formosa*. Cette suppression de la bactérie entraîne une diminution de la fécondité du parasitoïde, qui entraîne à son tour l'accroissement des populations de l'hôte, à savoir des mouches blanches, ou aleurodes.

LES COMPORTEMENTS

Si l'efficacité des prédateurs et des parasitoïdes en lutte biologique dépend du synchronisme de leur cycle de vie avec celui des ravageurs des cultures, elle dépend également de leur capacité à trouver et exploiter les ravageurs efficacement. Les effets de la température sur le comportement des ravageurs et de leurs ennemis naturels pourraient ainsi représenter des facteurs tout aussi importants que les traits physiologiques, mais ceux-ci ne sont pour l'instant que très peu étudiés.

TAUX DE PRÉDATION ET DE PARASITISME De manière générale, les insectes se déplacent et consomment des ressources plus rapidement lorsque la température augmente, tant que l'extrême thermique propre à chaque espèce n'est pas atteint. On peut donc s'attendre à ce que le taux de prédation/parasitisme augmente dans les années à venir. D'ailleurs, ce phénomène a été observé dans plusieurs études (ex : Bourchier et Smith 1996; Cocuzza *et al.* 1997; Sentis *et al.* 2012, 2013; Zamani *et al.* 2006). Néanmoins, la température influence également les comportements de défense des phytophages, les rendant plus ou moins susceptibles à leurs ennemis naturels selon le cas. Ainsi, les pucerons de la pomme de terre se défendent physiquement d'une manière plus agressive que lorsque la température augmente, réduisant d'autant l'efficacité des parasitoïdes (Brodeur *et al.* 2013) (Figure 3).

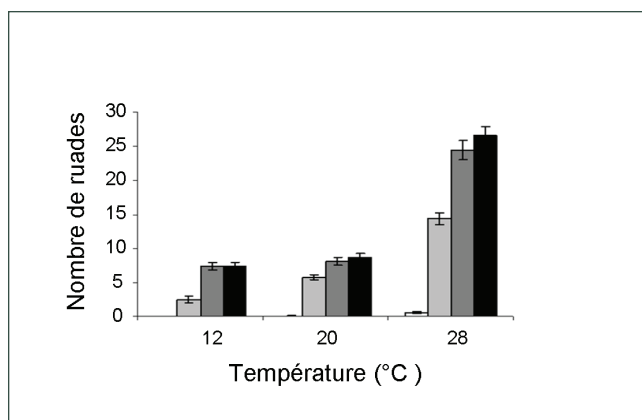


Fig. 3 : Nombre de ruades donnés par les pucerons *M. euphorbiae* empêchant le parasitisme, lorsqu'ils sont attaqués par le parasitoïde *Aphidius ervi* à différentes températures

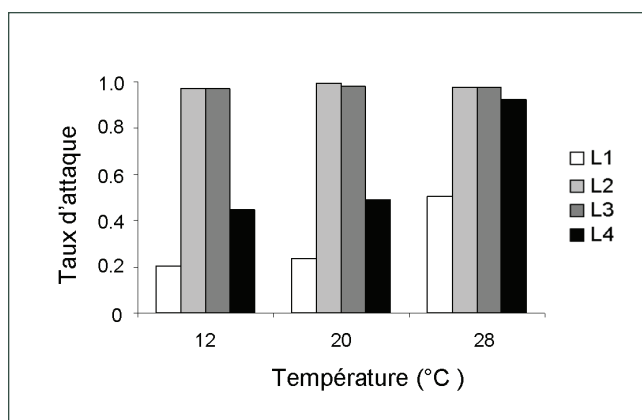


Fig 4. Taux d'attaque de *M. euphorbiae* par le parasitoïde *Aphidius ervi* en fonction du stade larvaire de l'hôte (L1 à L4) à différentes températures. Le stade L1 représente le premier stade larvaire des pucerons et le stade L4 le dernier, survenant avant le passage au stade adulte.

À l'inverse, les pucerons du pois *Acyrtosiphon pisum* s'enfuient plus rarement à haute température et restent alors plus exposés à leurs ennemis naturels (Dill *et al.*, 1990). Ici encore, les effets de la température sont spécifiques et il est complexe de tirer des conclusions générales.

DIVERSITÉ DES RESSOURCES La température affecte non seulement la quantité de proies/hôtes exploités par les prédateurs et parasitoïdes, mais également leur diver-

sité. Ainsi, une augmentation de température induit généralement l'acceptation d'une plus grande variété de ressources, même si celles-ci sont de moins bonne qualité. Cet effet a notamment été observé chez certaines espèces de fourmis (Traniello *et al.*, 1984), ainsi que chez le parasitoïde de pucerons *A. ervi*, qui s'attaque à tous les stades larvaires de pucerons lorsque la température augmente, alors qu'il n'attaque que les deux stades optimaux pour son développement en condition standard (Figure 4).

Cette influence peut sembler positive, puisque davantage de ravageurs seront tués, cependant, la ponte de descendants dans des hôtes non optimaux résulte en une forte diminution du nombre de parasitoïdes émergeant et par conséquent, une réduction de la taille de leur population. Les conséquences, bien que positives pour certains aspects, pourraient donc être, au final, négatives à plus grande échelle.

SEX-RATIO Le sex-ratio (défini ici comme la proportion de mâles au sein d'une population) est un élément démographique important en lutte biologique, en particulier pour les parasitoïdes chez qui l'essentiel de la régulation des ravageurs est opéré par les femelles. De manière générale, on observe chez les parasitoïdes une augmentation du nombre de mâles à basse et haute température, en comparaison des températures moyennes (King 1987), comme par exemple chez le parasitoïde d'œufs de lépidoptères *Trichogramma euproctidis* (Figure 5).

L'augmentation des températures et des extrêmes pourrait donc être néfaste en lutte biologique. Cependant, il a été observé que l'augmentation du nombre de mâles à haute température est liée à un mécanisme comportemental, c'est-à-dire que la femelle décide elle-même de pondre plus de mâles dans ces conditions (Brodeur *et al.* 2013). Les traits comportementaux évoluent relativement vite en comparaison d'autres traits. Il est donc vraisemblable qu'à court terme, une augmentation de la température induise une production accrue de mâles, et donc une moins bonne régulation des ravageurs, mais qu'à moyen et long-terme, l'équilibre mâles-femelles revienne à son état initial, grâce à une évolution rapide du comportement.

THERMORÉGULATION L'influence de la température sur le synchronisme entre les cycles de vie du ravageur et

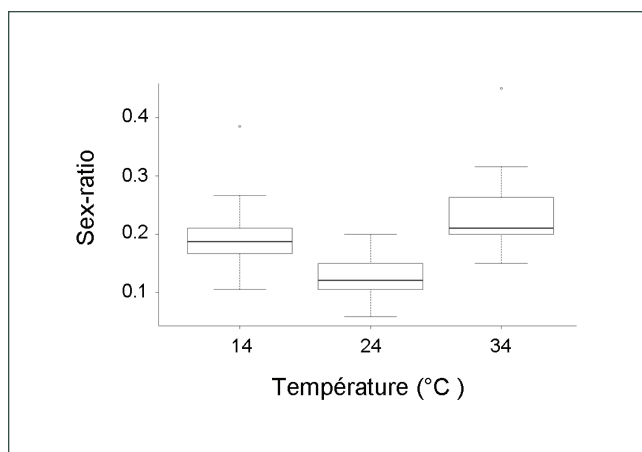


Fig. 5 : Sex-ratio mesuré à trois températures de ponte chez le parasitoïde *Trichogramma euproctidis*.

de ses ennemis naturels est primordial, mais leur répartition spatiale l'est tout autant. Les insectes ont la capacité de rechercher sur de petites échelles (par exemple, un champ, une haie), des sites avec des conditions thermiques favorables à leurs activités. Ce comportement de thermorégulation pourrait avoir des conséquences importantes en lutte biologique dans le cas où les ravageurs supporteraient mieux les températures élevées que leurs ennemis naturels. En effet, si ces derniers quittent les sites trop chauds pour s'abriter alors que les ravageurs restent sur ces mêmes sites, un déséquilibre se créera, les populations de ravageurs n'étant plus régulées. Un très bel exemple a été proposé par Barton (2010), qui a simulé une augmentation de température, semblable à celle prédite par le programme de recherche des États-Unis sur les changements climatiques, sur un couple criquets-araignées des prairies nord-américaines. Il a observé que les araignées, peu adaptées aux températures élevées, se réfugient plus bas dans le couvert végétal et n'ont plus la capacité de capturer les criquets qui eux supportent bien l'augmentation de température et demeurent dans le haut du couvert végétal. Cette augmentation de la température a donc pour effet de libérer les criquets de la pression de prédation exercée par les araignées. Il en résulte alors une augmentation des dégâts aux plants et un accroissement de la reproduction des criquets.

LE POTENTIEL ADAPTATIF DES INSECTES

Toutes les prédictions présentées auparavant supposent que dans les années à venir, les arthropodes vont répondre aux températures de façon similaire à aujourd'hui. Néanmoins, leurs caractéristiques biologiques ne sont pas fixes et sont appelées à évoluer. Plusieurs techniques nous permettent de prédire partiellement ce qu'il adviendra à long terme. La plus répandue consiste à comparer une région donnée, le Québec par exemple, avec une région plus chaude. À long terme, les arthropodes de la région d'intérêt devraient évoluer de façon similaire à ceux des régions plus chaudes. Par exemple, on a pu observer que les espèces des latitudes tempérées ont une température minimale de développement inférieure à celles des latitudes tropicales et subtropicales (Figure 6), mais un cumul nécessaire de degrés-jour plus important (Brodeur *et al.* 2013). Il y a visiblement eu adaptation de ces espèces.

On peut dès lors supposer que les arthropodes qui connaîtront des conditions de vie similaires évolueront de la même façon, et que les prédateurs et ennemis naturels finiront par s'adapter pour à nouveau limiter les ravageurs de culture. Ces processus sont cependant longs et ne pourront prémunir l'agriculture de possibles dommages dans les prochaines années.

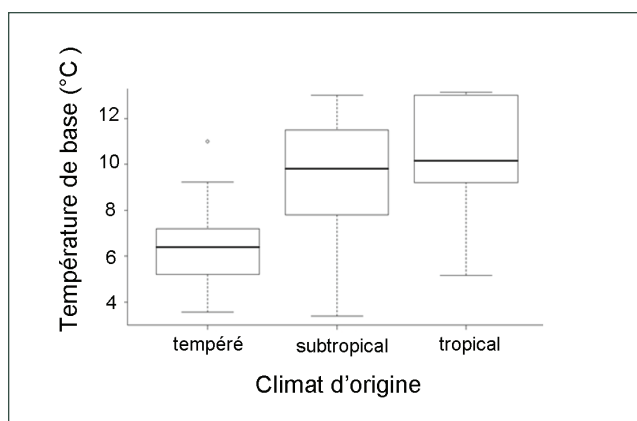


Fig. 6 : Température de base moyenne des arthropodes selon leur climat d'origine.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Il est extrêmement complexe de tirer des conclusions générales sur l'impact différentiel du réchauffement climatique sur les insectes ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels tant les réponses à la température varient d'une espèce à l'autre.
- Le cycle saisonnier des insectes devrait changer dans les années à venir, ce qui devrait altérer le synchronisme entre ravageurs et ennemis naturels, parfois au bénéfice et parfois au détriment de l'agriculture.
- Des ravageurs devraient étendre leur aire de répartition vers le nord et être capables de survivre aux nouvelles conditions rencontrées dans la province. Dans certains cas leurs ennemis naturels suivront cette expansion au même rythme, dans d'autres leur progression sera plus lente.
- Le taux de reproduction différentiel entre ravageurs et ennemis naturels pourrait être modifié, au bénéfice ou au détriment de l'agriculture.
- Les taux de prédation et de parasitisme devraient augmenter avec un réchauffement. Néanmoins, les ravageurs pourraient alors se défendre plus activement.
- Les insectes pourraient augmenter la diversité des ressources qu'ils consomment.
- À long-terme, les ravageurs comme leurs ennemis naturels devraient s'adapter aux nouvelles conditions climatiques.

RÉFÉRENCES

- Atkinson, D. 1994. Temperature and organism size—a biological law for ectotherms. *Advances in Ecological Research* 25: 1-58.
- Barton, B.T. 2010. Climate warming and predation risk during herbivore ontogeny. *Ecology* 90: 2811-2818.
- Boivin, G. 1999. Integrated management for carrot weevil. *IPM Reviews* 4: 21-37.
- Bourchier, R.S. & S.M. Smith. 1996. Influence of environmental conditions and parasitoid quality on field performance of *Trichogramma minutum*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 80: 461-468.
- Brodeur J., Boivin G., Bourgeois G., Cloutier C., Doyon J., Grenier P., Gagnon A.-È. 2013. Impacts des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels: conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec. Rapport Ouranos. Rapport final projet Ouranos N° 5500005-103.
- Cocuzza, G.E., P. De Clercq, S. Lizzio, M. Van de Veire, L. Tirry, D. Degheele & V. Vacante. 1997. Life tables and predation activity of *Orius laevigatus* and *O. albidipennis* at three constant temperatures. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 85: 189-198.
- Dempster, J. P., D.A. Atkinson, & M.C. French. 1995. The spatial dynamics of insects exploiting a patchy food resource. II. Movements between patches. *Oecologia* 104: 354-362.
- Dill, L.M., A.H.G Fraser & B.D. Roitberg. 1990. The economics of escape behaviour in the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. *Oecologia* 83: 473-478.
- Elzinga, J.A., S. van Nouhuys, D.J. van Leeuwen & A. Biere. 2007. Distribution and colonisation ability of three parasitoids and their herbivorous host in a fragmented landscape. *Basic and Applied Ecology* 8: 75-88.
- Gagnon, M.E. 2013. Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques. Rapport final projet Ouranos N° 5500004-PXI.
- Guay, J. F., S. Boudreault, D. Michaud & C. Cloutier, C. 2009. Impact of environmental stress on aphid clonal resistance to parasitoids: Role of *Hamiltonella defensa* bacterial symbiosis in association with a new facultative symbiont of the pea aphid. *Journal of Insect Physiology* 55: 919-926.
- Hance, T., J. van Baaren, P. Vernon & G. Boivin. 2007. Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. *Annual Review of Entomology* 52: 107-126.
- Honk, A. 1993. Intraspecific variation in body size and fecundity in insects: A general relationship. *Oikos* 66: 483-492.
- King, B.H. 1987. Offspring sex ratios in parasitoid wasps. *Quarterly Review of biology* 62: 367-396.
- Pintureau, B., L. Chapelle, & B. Delobel. 1999. Effects of repeated thermic and antibiotic treatments on a *Trichogramma* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) symbiont. *Journal of Applied Entomology* 123: 473-483.
- Roland, J. 1993. Large-scale forest fragmentation increases the duration of tent caterpillar outbreak. *Oecologia* 93: 25-30.

RÉFÉRENCES

- Sentis, A., J.-L. Hemptinne & J. Brodeur. 2012. Using functional response modelling to investigate the effect of temperature on predator feeding and energetic efficiency. *Oecologia* 169: 1117-1125.
- Sentis, A., Hemptinne, J.-L. & Brodeur, J. 2013. Effects of simulated heat waves on an experimental plant-herbivore-predator food chain. *Global Change Biology* 19: 833-842.
- Thomas, M.B. & S. Blanford. 2003. Thermal biology in insect-parasite interactions. *Trends in Ecology and Evolution* 18: 344-350.
- Traniello, J.F.A., M.S. Fujita. & R.V. Bowen. 1984. Ant foraging behavior: ambient temperature influences prey selection. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 15: 65-68.
- Vangansbeke, D., L. De Schrijver, T. Spranghers, J. Audenaert, R. Verhoeven, D. Tung Nguyen, B. Gobin, L. Tirry, P. De Clercq. 2013. Alternating temperatures affect life table parameters of *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus californicus* (Acari: Phytoseiidae) and their prey *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Experimental and Applied Acarology* 61: 285-298.
- van Nouhuys, S. 2005. Effects of habitat fragmentation at different trophic levels in insect communities. *Annales Zoologica Fennici* 42: 433-447.
- Zamani, A.A., A. Talebi, Y. Fathipour & V. Baniameri. 2006. Effect of temperature on life history of *Aphidius colemani* and *Aphidius matricariae* (Hymenoptera: Braconidae), two parasitoids of *Aphis gossypii* and *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Environmental Entomology* 36: 263-271.
- Zhou, S.-X., Y. Li & F. Zhang. 2009. Influences of high temperature shock on the reproduction and development of the *Wolbachia*-induced parthenogenetic parasitoid wasp, *Encarsia formosa* (Gahan). *Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica* 29: 4732-4737.