



HAL
open science

Impact du changement climatique sur les populations d'insectes forestiers

Alain Roques, Christelle Robinet

► **To cite this version:**

Alain Roques, Christelle Robinet. Impact du changement climatique sur les populations d'insectes forestiers. Journée d'information et de débat "la forêt face aux changements climatiques : acquis et incertitudes", Dec 2005, Paris, France. 11 p. hal-02825465

HAL Id: hal-02825465

<https://hal.inrae.fr/hal-02825465>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact du changement climatique sur les populations d'insectes forestiers

Impact of global warming on forest pest dynamics

ROQUES, Alain ; ROBINET, Christelle

**INRA, Zoologie Forestière Orléans, Ardon, BP 20619, 45166 Olivet –
alain.roques@orleans.inra.fr, robinet@orleans.inra.fr**

Résumé

Les effets du changement climatique sur les insectes forestiers peuvent être directs, en affectant leur physiologie (mortalité, cycle et vitesse de développement, ...), indirects en agissant sur les plantes- hôtes (phénologie, modification d'aire, stress hydrique, ...), et/ou encore affecter les interactions entre l'espèce considérée et ses compétiteurs et ennemis naturels au sein des communautés animales. La majorité des études ont concerné l'influence de l'augmentation moyenne de la température, qui constitue un facteur décisif pour la survie et le taux d'accroissement des populations d'insectes. Cependant, d'autres variables telles que précipitations, humidité relative, durée d'insolation, ou concentration en CO₂, sont à considérer car elles influent largement sur les plantes- hôtes. Pour la plupart des espèces d'insectes des régions tempérées, il existe des seuils minimaux de températures spécifiques pour la survie et le développement de chacun des stades (oeuf, larves des différents stades, adultes). L'expansion vers le nord et/ou en altitude d'un certain nombre d'espèces apparaît ainsi une réponse directe au déplacement des isothermes climatiques d'environ 120km vers le nord au 20^{ème} siècle en Europe. C'est en particulier le cas pour les insectes à développement larvaire hivernal, comme la processionnaire du pin, qui n'est plus aujourd'hui freinée que par la faible capacité de vol des femelles. Une modélisation prédictive de l'expansion sous une hypothèse basse d'évolution climatique (+2.3°C) suggère son arrivée dans Paris intra-muros pour 2025. La fréquence plus importante d'évènements climatiques extrêmes est néanmoins susceptible de ralentir ou d'accélérer, selon les cas, ce processus. Le changement climatique peut aussi conduire à désynchroniser la coïncidence adaptative existant entre l'insecte et l'arbre- hôte, notamment chez les insectes passant l'hiver à l'état d'oeuf et dont les jeunes larves éclosent en coïncidence avec le débourrement végétatif. En raison de seuils de développement différents pour la plante et l'insecte, des printemps plus chauds peuvent conduire à une éclosion avancée des larves/chenilles par rapport à l'apparition des feuilles de l'arbre. L'effet sur les ennemis naturels, moins documenté, semble très variable selon les espèces.

Mots-clés

Insecte, arbre forestier, réchauffement climatique, expansion géographique, phénologie

Abstract

Impacts of climatic change on forest insects can be direct, by affecting their physiology (e.g., survival, cycle, development rate), indirect while acting on the host trees (e.g., phenology, range, drought), and/or affect the interactions with the competitors and natural enemies existing within the ecosystems. Most studies only dealt with temperature increase, which constitutes a key factor for survival and development of insect populations. However, other variables such as precipitations, relative humidity, isolation, or concentration in CO₂, are to be considered because they may largely influence the host plants. For most insect species developing in temperate areas, minimal thresholds of temperatures specifically exist for the survival and the development of each stage (egg, larva at successive instars, pupa, adult). The expansion towards the north and/or in altitude of a number of species thus appears a direct response to the displacement of the climatic isotherms of approximately 120km towards north during the 20th century in Europe, as shown by experimental translocations of insects outside their natural range. It is especially verified for forest insects with winter larval development, such as the pine processionary moth, whose current expansion is only slowed by the low flight capacity of females. A predictive modelling of its expansion under the "best" scenario for future warming up (+2.3°C) suggests the moth arrival in downtown Paris by 2025. However, highest frequencies of climatic anomalies may slow down or accelerate this process according to species and site as shown by the 2003 summer heat. The climatic change can also result in desynchronizing the adaptive coincidences existing between insects and host trees, especially when insects are overwintering as eggs, the young larvae hatching in coincidence with the tree bud burst. Because of different thresholds of development for the plant and the insect, warmer springs can lead to an early hatching of larvae, in advance to foliage appearance. The effect on natural enemies, which is less documented, seems highly variable according to species.

Keywords

Insect, forest tree, global warming, range expansion, phenology

Introduction

Beaucoup de travaux ont prédit que le changement climatique pourrait avoir des conséquences majeures sur les populations d'insectes forestiers: changement dans la distribution géographique, dans la fréquence et l'intensité des pullulations, relations altérées avec les ennemis naturels, découplage des relations avec les arbres- hôtes, et plus généralement décroissance de la biodiversité (Williams et Liebhold, 1995 ; Ayres et Lombaredro, 2000 ; Harrington et al., 2001 ; Logan et al., 2003). Les pullulations soudaines enregistrées ces derniers temps, notamment en Amérique du Nord, ont d'ailleurs souvent été attribuées d'office à la responsabilité directe du réchauffement climatique. Il semble que la réalité soit, dans la plupart des cas, plus complexe. Dans le contexte actuel de changement global caractérisé par des modifications profondes des habitats (déforestation, urbanisation, ...) et du climat (température, précipitations, fréquence des

événements extrêmes, ...), mais aussi par des mouvements croisés des populations végétales et animales (incluant les invasions biologiques) résultant de la mondialisation accélérée des échanges commerciaux, les populations d'insectes sont soumises à de fortes modifications de leur environnement. Ces modifications vont les affecter directement ou indirectement via leurs hôtes et leurs antagonistes. Si l'on s'en tient au seul changement climatique, la complexité de ces interactions peut être schématisée sous la forme du diagramme suivant (Figure 1).

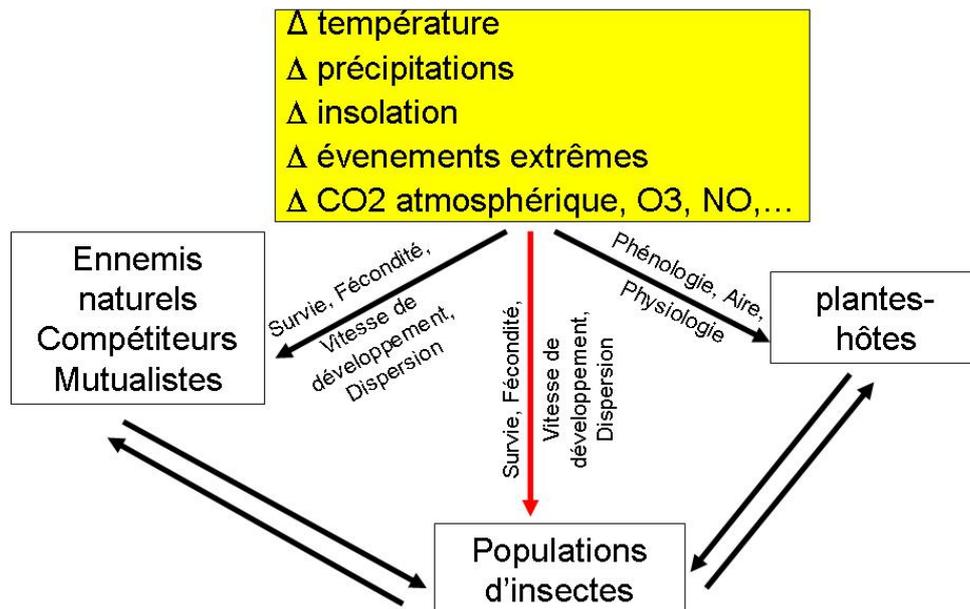


Figure 1: Schéma simplifié de l'impact direct (flèche rouge) et indirect (flèches noires) du changement climatique sur les populations d'insectes forestiers et les composantes associées des écosystèmes forestiers.

Il apparaît ainsi difficile d'isoler une des variables impliquées pour avoir une appréciation de l'impact du changement climatique sur les populations d'insectes forestiers. Cependant, la plus grande partie des travaux réalisés jusqu'à ce jour n'ont concerné que la seule température même si des études récentes s'intéressent aux effets sur les insectes de la variabilité croissante des précipitations (Stireman et al., 2005) ou d'une augmentation de la teneur atmosphérique en gaz tels que le CO₂ (Newmann, 2005). La plupart de ces dernières études ont cependant été menées en conditions contrôlées, sans validation sur le terrain. Dans cet article, nous considérerons donc essentiellement la température et ses variations.

L'Europe s'est réchauffée d'environ 0.8°C au cours du siècle passé, les isothermes climatiques progressant vers le Nord de 120 Km en moyenne (Parmesan et al., 1999). Les insectes étant des organismes à sang froid, leur cycle biologique est largement dépendant de la température, et les contraintes thermiques spécifiques à chacune des espèces vont délimiter les frontières potentielles de leur distribution géographique. Cependant, dotés le plus souvent d'une grande mobilité, d'un cycle de développement significativement plus court que celui des arbres, et d'importantes capacités adaptatives, de nombreux insectes forestiers apparaissent capables de répondre rapidement, et en tout cas plus rapidement que leurs hôtes, à un réchauffement climatique. Prenant en compte que les pronostics désormais quasi- consensuels vont dans le sens d'un réchauffement global compris entre 2.1 et 4.6°C pour le siècle en cours (Parmesan et al., 1999), il apparaît important d'apprécier comment les populations ont d'ores et déjà répondu à l'augmentation comparativement plus faible intervenue durant les dernières décennies.

Nous aborderons en détail les effets directs du réchauffement climatique. En revanche, seuls quelques-uns des effets indirects via les arbres- hôtes et les ennemis naturels seront traités. En particulier, l'impact de la sécheresse et du stress hydrique sur la physiologie et les capacités de résistance des arbres- hôtes, largement développé par ailleurs ne sera pas abordé. Enfin, nous préciserons les conséquences attendues en termes de modification d'aire et de pullulations.

1. Effet direct sur la survie et le développement des populations d'insectes forestiers

Les conditions climatiques, et plus particulièrement la température, influent directement sur l'ensemble des processus physiologiques de développement des insectes au plan individuel: survie hivernale, vitesse de développement des différents stades larvaires, potentiel reproductif, envol et dispersion des adultes, etc... En effet, des bornes thermiques spécifiques existent pour chacun des stades de développement (ex. température létale minimale et maximale) comme des comportements (ex., température minimale pour l'envol), et entre ces bornes une relation (linéaire ou autre) existe entre l'augmentation de la température et l'intensité du phénomène. Une augmentation même minime de la température va ainsi tendre à moduler ces processus. On ne peut donc considérer les effets du réchauffement sur le développement et les performances des insectes à partir d'une augmentation moyenne annuelle de la température. Bien que cette variable soit la plus souvent utilisée dans la pratique pour caractériser le réchauffement, ses effets vont en effet se différencier en fonction de la saison et du cycle biologique des insectes. Suivant le stade de développement des insectes, l'augmentation des températures ne va pas avoir les mêmes conséquences (et même éventuellement des effets contradictoires- cf. ci-dessous) en hiver, au printemps, en été ou à l'automne, et ce d'autant plus qu'il existe une dissymétrie dans le réchauffement, les minima de température tendant à augmenter plus vite que les maxima.

Sous les latitudes tempérées, **le réchauffement hivernal constitue vraisemblablement un des facteurs qui a les conséquences les plus importantes pour les insectes forestiers.** En effet, la mortalité hivernale résultant des basses températures est un facteur clé régulant la dynamique des populations de nombreuses espèces. Si certains insectes sont capables de geler sans dommages (par. ex, beaucoup d'adultes de Carabes), la plupart passent l'hiver à l'état d'œuf ou de larves hivernantes, voire continuent leur développement en hiver dès lors que la température le permet (processionnaire du pin, nombreux pucerons). Des seuils minimaux de température, au- dessous desquels il n'y pas de survie possible (température létale minimale), ont ainsi été mis en évidence pour les différents stades de nombreux insectes. Ce seuil peut être très bas chez des espèces hivernant à l'état d'œuf, comme la tordeuse du Mélèze (*Zeiraphera diniana* ; -40°C), mais il se situe autour de -16°C chez les chenilles d'hiver de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* (Demolin, 1969) comme chez plusieurs espèces de scolytes hivernant à l'état larvaire (*Dendroctonus frontalis* aux USA ; Ungerer et al., 1999). Une augmentation même minime des températures hivernales est donc susceptible d'augmenter de manière notable la survie hivernale dans des zones a priori défavorables pour ces insectes. En plus de températures supérieures à -16°C, les chenilles de la processionnaire du pin ont besoin, pour quitter leur nid, se nourrir et ainsi pouvoir achever leur développement normal, d'une température diurne minimale de 9°C dans le nid suivie d'une température nocturne de l'air d'au moins 0°C (Battisti et al., 2005). Très rarement atteintes au début des années 1990 dans le Bassin Parisien, ces conditions se sont généralisées à partir de 2000, l'ensemble de la région devenant favorable au développement de cet insecte en l'espace de moins de 10 ans (Robinet et al., sous presse ; Figure 2). Cela a été clairement vérifié par des expérimentations de transplantation de colonies de processionnaires qui ont révélé qu'une certaine proportion de chenilles pouvait survivre largement au-delà des fronts actuels dans le Bassin parisien et les Alpes (1850m d'altitude pour un front actuel à 1200m).

Sur un plan encore marginal aujourd'hui mais vraisemblablement important dans le proche avenir, le réchauffement hivernal est aussi susceptible de lever les seuils thermiques létaux bloquant les possibilités d'installation d'espèces exotiques d'origine subtropicale voire tropicale, au moins dans les zones méridionales. On peut déjà l'observer avec l'expansion actuelle en zone méditerranéenne du papillon du Palmier, *Paysandisia archon*, en provenance d'Amérique du Sud.

Le printemps constitue un moment essentiel de reprise du développement larvaire pour la majorité des insectes forestiers, notamment les défoliateurs. **L'augmentation des températures printanières va donc tendre à accélérer les processus physiologiques et, entre autres, conduire à un développement plus rapide des différents stades larvaires.** Dans une étude portant sur 104 espèces de microlépidoptères inféodées aux arbres fruitiers et forestiers aux Pays-Bas, Ellis et al. (1997) ont mis en évidence que le pic de vol a été avancé en moyenne de 11.6 jours durant la période 1975-1994, en relation directe avec la hausse des températures printanières. La dispersion des adultes peut en être

aussi facilitée car les seuils de température minimaux nécessaires pour l'essaimage, de 12°C par exemple pour le scolyte *Tomicus piniperda*, sont plus fréquemment atteints. Les performances reproductrices apparaissent aussi favorisées dans la plupart des cas. Chez le puceron du pin, *Schizolachnus pineti*, la fécondité est ainsi optimale sous des températures de 24 à 25°C (Holopainen & Kainulainen, 2004).

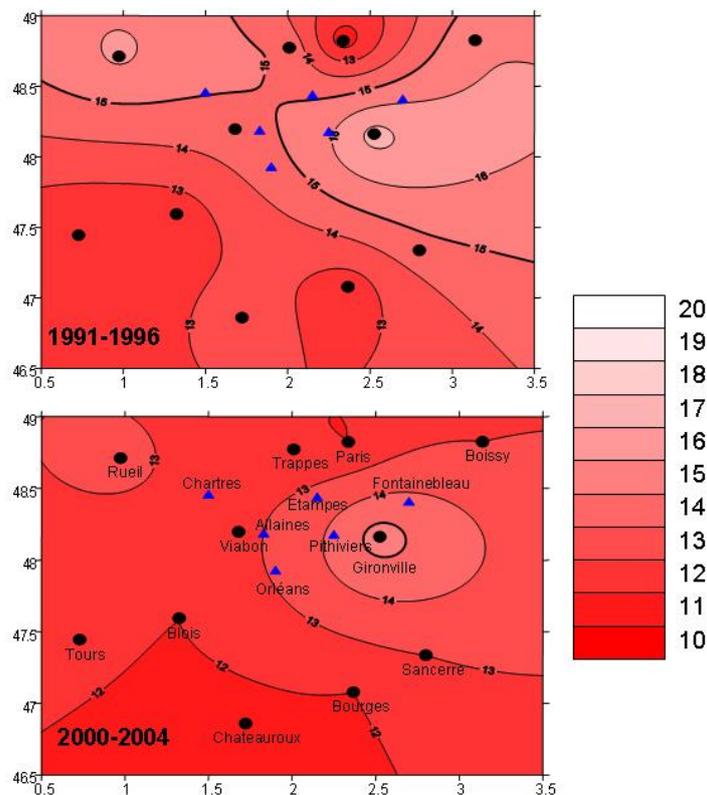


Figure 2: Modification entre 1991- 1996 et 2000- 2004 des conditions de développement offertes aux chenilles de processionnaire du pin dans le sud du Bassin parisien : cartographie du nombre moyen de jours consécutifs de famine susceptibles d'être endurés selon les zones à partir des contraintes climatiques sur la nutrition ($T_{nid} jour < 9^{\circ}C$ ou $T_{air} nuit < 0^{\circ}C$) (d'après Robinet et al., sous presse).

Les mêmes effets d'accélération du développement larvaire peuvent être observés chez certaines espèces à développement larvaire estival. Cependant, les effets du réchauffement estival peuvent être inverses. Les chenilles de processionnaire du pin doivent éviter les températures supérieures à 30°C, et se chrysalider dans le sol avant leur survenue pour y échapper. La date de nymphose tend ainsi à avancer dans le temps au niveau des zones situées le plus au sud du Bassin Méditerranéen (Demolin, 1969). De plus, en 2003 les températures inhabituellement supérieures à 40°C ont largement perturbé le processus

d'accouplement et de ponte, ainsi que l'éclosion des jeunes larves de cette espèce aboutissant à la disparition de nombreuses colonies dans le Bassin Parisien. **Pour une même espèce le réchauffement peut donc avoir des effets opposés, positifs en hiver et négatifs en été.** De nombreuses espèces, de scolytes notamment, sont aussi susceptibles de stopper leur activité et d'entrer en diapause estivale dès lors que les températures sont trop élevées. L'augmentation des températures en automne résulte également dans une plus longue saison de développement pour un certain nombre d'espèces à développement continu. Une des conséquences de cette accélération du développement est l'augmentation du nombre de générations annuelles chez les espèces multivoltines. Chez des espèces de scolytes (ex. typographe- *Ips typographus*) et de pucerons le nombre de générations n'est limité que par des facteurs du milieu comme la température ou la photopériode. En raison des seuils de développement souvent très bas pour les différents stades de développement et de courtes durées de génération, une augmentation des températures hivernales et printanières de 2°C est estimée conduire à 4-5 générations de plus par an pour certains pucerons (Harrington et al., 2001).

2. Effet indirect : modification des relations phénologiques entre insectes et arbres- hôtes

Il est indispensable pour de nombreux phytophages de synchroniser leur développement avec celui de la plante- hôte. C'est en particulier le cas pour les insectes forestiers passant l'hiver à l'état de larve ou d'œuf, comme de nombreux Lépidoptères forestiers, alors que leurs hôtes sont à feuilles caduques (par ex. Tordeuse du mélèze, *Zeiraphera diniana*). L'éclosion des œufs ou la reprise d'activité des larves doit coïncider rigoureusement avec le débourrement foliaire afin que l'alimentation soit possible. Pour l'insecte comme pour l'arbre, il y a nécessité d'une exposition prolongée au froid, avec des exigences spécifiques, pour lever la dormance/ diapause ; puis la durée du développement pour arriver à l'éclosion/ débourrement va dépendre des températures endurées lors du printemps. Or, les seuils de début de développement peuvent être différents. Alors que le développement du bourgeon d'érable sycomore est initié dès lors que la température dépasse 0°C mais celui du puceron du sycomore ne démarre qu'à 5°C (Dixon, 2003). Un réchauffement peut donc provoquer un développement accéléré pour un des éléments du couple arbre- insecte par rapport à l'autre et un découplage de synchronie entre l'insecte et son hôte. Une telle tendance au découplage a déjà été observée aux Pays-Bas pour un Lépidoptère, la Cheimatobie (*Operophtera brumata*) et le chêne (Visser et Holleman, 2001). Même s'il existe de fortes variations inter- annuelles, les chenilles ont avancé en moyenne leur éclosion de 12 à 24 jours par rapport à l'apparition des premières feuilles de chênes entre 1975 et 2000. Cependant, la variabilité individuelle des dates d'émergence, comme les possibilités éventuelles de changements d'hôtes, devraient à permettre aux insectes de s'adapter rapidement, vraisemblablement au travers d'une sélection d'une partie de la population de départ (Dixon, 2003).

3. Effet indirect : modification des relations entre insectes et ennemis naturels

Si les insectes phytophages peuvent souvent répondre rapidement à des changements climatiques susceptibles d'influencer leur développement, leurs ennemis naturels sont aussi affectés non seulement par cette variation du climat mais aussi par la variance imprévisible dans la réponse au climat de la dynamique des populations de leurs hôtes. Dans un certain nombre de cas la synchronie entre la période d'activité des proies et celles des antagonistes sera conservée lorsque le même déterminisme thermique est en jeu. En revanche, si la proie et son antagoniste ont des optimums thermiques ou des seuils de développement différents, le réchauffement aura des implications importantes sur la dynamique de population de l'insecte phytophage. Par exemple, au Canada les chenilles de tordeuse de l'épicéa, *Choristoneura fumiferana*, ont une température optimale de développement de 26.6°C, qui est nettement supérieure à celle de ses ennemis naturels. En se développant plus vite sous été plus chaud, les chenilles tendent donc à diminuer le temps d'exposition aux ennemis (Fleming et Candau, 1998). L'inverse peut être aussi vrai chez d'autres espèces.

La variabilité accrue du climat constitue un facteur en soi. En étudiant le parasitisme de Lépidoptères défoliateurs sur une large gamme géographique, du Canada au Brésil, Stireman et al. (2005) ont ainsi montré que le parasitisme global décroît à mesure que la variabilité des précipitations augmente. Dans cette étude, plus l'imprévisibilité du climat augmente, plus les parasites spécifiques semblent défavorisés par rapport aux généralistes car ils sont plus sensibles à des variations dans la date d'émergence de l'hôte ou dans sa vitesse de développement.

4. Conséquences en termes de pullulations

La conjonction des réponses au réchauffement climatique détaillées ci-dessus est susceptible de conduire à des modifications profondes dans la dynamique des populations de certains insectes forestiers. On peut en avoir un avant-goût avec les phénomènes qui ont perturbé le cycle de pullulation de la tordeuse du mélèze sur l'ensemble des Alpes à la fin des années 1980 (Baltensweiler, 1993). Cet insecte présente un cycle de pullulations typique de 8-10 ans, progressant d'une période de latence où la densité de chenilles est de l'ordre de 0.001 par Kg de rameaux pour culminer à une densité supérieure à 500 chenilles par Kg et revenir ensuite en 2-3 ans à une densité de latence. Le développement de la pullulation est, entre autres, basée sur une synchronisation quasi-parfaite entre éclosion des œufs et débourrement des aiguilles de mélèze durant la phase de progression de la population. Les températures inhabituellement hautes intervenues durant trois hivers et printemps successifs entre 1989 et 1991 semblent avoir conduit à une mortalité importante des œufs et à un découplage de l'éclosion des jeunes larves et du débourrement du mélèze. En résultat, les populations de tordeuses se sont effondrées prématurément avant la culmination, et l'ensemble du cycle a été profondément modifié. On peut également émettre l'hypothèse qu'en raison de

leur taux de multiplication élevé à chaque génération, les scolytes multivoltins voyant leur nombre de générations augmenter auront des capacités de pullulation supérieures à celles observées actuellement. Mais les dégâts dépendront de l'état physiologique des peuplements forestiers, lui aussi dépendant des conditions climatiques.

5. Une autre conséquence : la modification des aires de distribution d'insectes forestiers

Parmesan et al. (1999) ont montré qu'au cours du 20^{ème} siècle une majorité (63%) d'espèces européennes de papillons de jour a progressé de 35 à 240 km vers le nord alors qu'une minorité (3%) se déplaçait vers le sud, le reste étant stable. L'expansion de l'aire géographique d'une espèce au-delà de la zone couverte actuellement nécessite des capacités de dispersion, l'établissement de populations et leur persistance sur le long terme. L'établissement peut dépendre entre autres de la disponibilité des ressources, de l'effectif et de la composition de la population fondatrice et des facteurs climatiques. Jusqu'à maintenant, la majorité des insectes forestiers des zones tempérées présentent une aire de répartition plus limitée que celle de leurs arbres-hôtes, leur distribution étant restreinte par les températures hivernales d'autant plus basses que l'on monte vers le nord ou en altitude. La remontée vers le nord et en altitude des isothermes correspondant aux températures létales minimales a d'ores et déjà permis d'augmenter l'aire potentiellement colonisable.

La processionnaire du Pin en constitue un bon exemple. Durant les trois dernières décades, une expansion substantielle tant en latitude qu'en altitude a été observée sur l'ensemble du pourtour méditerranéen, et particulièrement en France, où cet insecte progresse actuellement vers le nord entre la Loire et la Seine, ainsi qu'en altitude dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central. Il a pu être ainsi établi que le front latitudinal a progressé de 87 km vers le Nord entre 1972 et 2004 dans le sud du Bassin Parisien, avec une notable accélération durant les 10 dernières années (55.7km). De manière similaire, la processionnaire a progressé de 110 m à 230 m en altitude entre 1975 et 2004 dans les Alpes (Battisti et al., 2005). Prenant en compte les contraintes thermiques citées plus haut (1.), un modèle mathématique nourri avec le scénario climatique de Météo-France le plus « optimiste » pour le siècle à venir (réchauffement moyen de 2.3°C) prévoit ainsi que Paris *intra-muros* pourrait être atteint dès 2025 par cet insecte à fort effet allergique pour l'Homme (Robinet et al., sous presse ; Figure 3). Les capacités de dispersion des femelles, variables d'une espèce à l'autre, restent cependant un facteur limitant (3-5 km par an au maximum pour la processionnaire) dès lors qu'il n'existe pas de transport direct (introductions volontaires) ou indirect par l'Homme.

De fait, même si les arbres sont aussi susceptibles de voir leur distribution se modifier avec le changement climatique, les insectes sont capables d'étendre leur distribution et coloniser de nouveaux habitats beaucoup plus vite que leurs hôtes. Cependant, il semble souvent assez difficile de séparer ce qui relève de l'impact direct du réchauffement et ce qui procède de la modification des habitats par

l'Homme, en particulier des reboisements. L'arrivée dans de nouvelles zones peut impliquer des changements d'hôtes pour survivre, comme cela peut être le cas pour le passage actuellement observé de la processionnaire du pin sur sapin de Douglas sur les contreforts sud du massif central (Battisti et al., 2005).

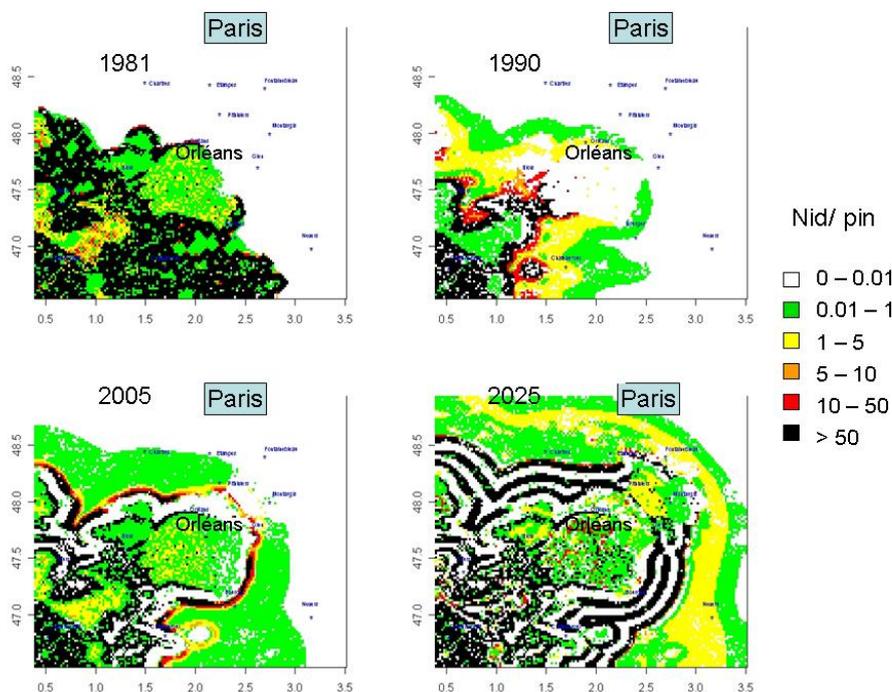


Figure 3: Modélisation de l'expansion passée et à venir de la processionnaire du pin dans le Bassin Parisien de 1981 à 2025 (d'après Robinet et al., sous presse). Les couleurs correspondent à des nombres moyens différents de nids par pin.

Enfin, la fréquence accrue des anomalies climatiques est susceptible de moduler largement l'effet du réchauffement climatique proprement dit. Des effets contradictoires des températures inhabituellement hautes enregistrées au cours des mois de Juillet et Août 2003 en Europe Occidentale ont été ainsi notés selon les sites pour la processionnaire du pin. Alors que la canicule dans le Bassin Parisien se traduisait par une disparition apparente (les chrysalides diapausantes dans le sol étant non touchées) de nombreuses colonies dans la zone de front, les températures supérieures à 30°C dans les Alpes Italiennes ont conduit à une progression « historique » de l'insecte en altitude, correspondant pour cette seule année à 38% de l'expansion des 30 dernières années (Battisti et al., 2006).

Conclusion

Trois aspects nous semblent essentiels à considérer dans les études à venir: l'impact des anomalies climatiques, qui apparaît largement sous-estimé ; les facteurs climatiques autres que la température, en particulier les précipitations et leur variabilité ; et le passage de cas d'espèces à une approche écosystémique prenant en compte les réponses des différentes composantes à un (des) même(s) variable(s) climatique(s).

Références bibliographiques

- Ayres M.P., Lombardero M.J., 2000. Assessing the consequences of climate change for forest herbivore and pathogens. *Science of the Total Environment*, 262, 263–286.
- Baltensweiler, W., 1993. Why the larch budmoth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. *Oecologia*, 1, 62-66.
- Battistti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A. & Larsson S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15, 2084–2096.
- Battistti A., Stastny M., Buffo.E., & Larsson S., 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12, 662-671.
- Demolin G., 1969. Bioecologia de la procesionaria del pino, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Incidencia de los factores climaticos. *Boletín del Servicio de Plagas Forestales*, 12, 9–24.
- Dixon, A. F. G., 2003. Phenological development of winter moth Operophtera brumata and its host plants. *Ecological Entomology*, 28, 380–381
- Ellis W.N, Donner J.H. et Kuchlein J.H., 1997. Recent shifts in phenology of microlepidoptera related to climatic change. *Entomologisches Berichten Amsterdam*, 57, 66-72.
- Fleming R.A. et Candau J.N., 1998. Influences of Climatic Change on Some Ecological Processes of an Insect Outbreak System in Canada's Boreal Forests and the Implications for Biodiversity, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2-3, 235-249
- Harrington R., Fleming R.A., Woiwod I., 2001. Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? *Agricultural and Forest Entomology*, 3, 233-240.
- Holopainen J.K. et Kainulainen P., 2004. Reproductive capacity of the grey pine aphid and allocation response of Scots pine seedlings across temperature gradients: a test of hypotheses predicting outcomes of global warming. *Canadian Journal of Forestry Research*, 34, 94–102.
- Logan J.A., Regnière J. et Powell J.A., 2003. Assessing the impacts of global warming on forest pests dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1, 130-137.
- Marçais B., Bouhot-Delduc L., et Le Tacon F., 2000. Effets possibles des changements globaux sur les micro-organismes symbiotiques et pathogènes et les insectes ravageurs des forêts. *Revue Forestière Française*, 52 , N° Spécial, 99-118.
- Newman, J.A. 2006. Climate change and the distribution and abundance of cereal aphids in Canada. *Global Change Biology*, 12, 1634-1642,
- Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C. et al., 1999. Poleward shifts in geographic ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399, 579–583.
- Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J., Schopf A. et Roques A., sous presse. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep.,Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography*, sous presse.
- Stireman III J.O., Dyer L.A., Janzen D.H. et al., 2005. Climatic unopredicatbiity and parasitism of caterpillars: Implications of global warming. *PNAS*, 102, 17384-17387.
- Ungerer M.J., Ayres M.P., Lombardero M.J., 1999. Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann(Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Biogeography*, 26, 1133–1145.
- Visser, M.E. et Holleman, L.J.M. 2001 Warmer springs disrupt the synchrony of Oak and Winter Moth phenology. *Proceedings Royal Society London B*, 268, 289-294
- Williams D.W. et Liebhold A.M., 2002. Climate change and the outbreak range of two North American bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, 4, 87-99.