

Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes

T. Boivin ⁽¹⁾, B. Sauphanor ⁽²⁾

¹ INRA, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes (UR629), Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 09

² INRA, Unité Plantes et Systèmes Horticoles (UR 1115), Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 09

Résumé

Dans le Sud-est de la France, une grande majorité des populations du carpocapse des pommes a développé des résistances à la plupart des insecticides chimiques employés. Les mécanismes de résistance impliqués ont cependant des effets secondaires sur la phénologie de cet insecte. En comparaison des individus sensibles, un développement larvaire plus lent chez les individus résistants est à l'origine de leur ségrégation phénologique, c'est à dire un retard significatif de leurs dates d'apparition au cours de la saison. De plus, une propension accrue à la diapause chez les larves résistantes de deuxième génération se traduit par une plus forte abondance d'individus sensibles au sein de la dernière des trois générations annuelles de carpocapses dans cette région. Dans des perspectives de protection durable en arboriculture fruitière, la prise en compte de cette évolution qualitative de la phénologie du carpocapse au sein de ces populations mixtes (sensibles/résistantes) représente un enjeu important. L'analyse et la compréhension de ce phénomène ont permis l'élaboration d'un modèle phénologique décrivant distinctement l'évolution saisonnière de populations sensibles et résistantes de carpocapses. Nos recherches pourraient ainsi contribuer à la définition de nouvelles stratégies de gestion des populations et des résistances grâce à un nouvel outil d'aide à la décision pour la répartition temporelle des différents moyens de lutte disponibles.

Des modèles phénologiques pour la protection des cultures

Depuis l'essor de l'agriculture commerciale moderne, la nécessité de développer des outils permettant de renforcer l'efficacité des méthodes de protection contre les ravageurs des cultures n'a cessé de prendre de l'importance. Les pesticides ont été l'une des nombreuses méthodes proposées dans ce but. Après 1945, l'émergence et la diversification croissante des pesticides chimiques marquèrent le début de l'ère de la régulation des populations de ravageurs par l'industrie chimique puisque ces nouveaux produits furent simples d'utilisation et efficaces contre la plupart des ennemis des cultures. La confiance et la place accordées à ce mode de protection ont conduit à une utilisation massive des pesticides chimiques qui, malgré leur succès commercial, a conduit en retour à une dépréciation de leur image auprès de la population en raison de plusieurs facteurs (Pimentel, 1997). Parmi ceux-ci, figurent par exemple la pollution des nappes phréatiques, les problèmes de santé publique, les menaces sur les organismes non-cibles et auxiliaires des cultures et l'apparition de résistances aux pesticides employés. Ce dernier facteur est particulièrement problématique car la baisse d'efficacité de certaines molécules qui en résulte induit un accroissement de la fréquence des traitements au cours de la saison, et une course effrénée de l'industrie vers de nouvelles molécules courant elles-mêmes le risque d'être à terme inopérantes.

Le phénomène de résistance aux pesticides concerne aujourd'hui plus de 600 espèces d'insectes et d'acariens à travers le monde. Ce contexte international a largement favorisé un recentrage des pratiques usuelles de contrôle des populations de ravageurs vers une gestion spécifique de ces

résistances, dans le but de prévenir leur expansion et leur généralisation. Ainsi, dans le cadre de la protection intégrée, ces stratégies ont pour objectif principal la limitation des dégâts aux cultures en minimisant l'emploi de pesticides chimiques et en intégrant toutes les méthodes de contrôle disponibles avec les facteurs naturels de régulation. Une prévision adéquate des fluctuations temporelles des populations d'un ravageur constitue un gain d'efficacité appréciable dans ces perspectives. Ainsi, dès le début des années 70, la recherche scientifique s'est intensifiée pour l'étude de la biologie et de la dynamique des populations des ravageurs, ainsi que des composantes de l'agro-écosystème dans lequel ils évoluent. L'acquisition de ces connaissances a permis progressivement la construction de modèles mathématiques pouvant décrire avec divers degrés de précision l'évolution dans le temps et l'espace des populations de ravageurs. Un système de protection basé sur ce type d'outil peut alors se concentrer sur des actions (échantillonnage, prophylaxie, pratiques culturales, traitements pesticides, lâchers d'ennemis naturels,...) réparties dans des fenêtres temporelles bien définies. En d'autres termes : utiliser la méthode de régulation la plus appropriée au moment le plus approprié.

Un modèle phénologique représente ainsi un outil de choix parce qu'il fournit une prédiction des dates d'occurrence de chacun des événements clés du cycle saisonnier d'un organisme. En protection intégrée, l'une de ses applications possibles est la définition de périodes d'utilisation optimale des méthodes de protection afin de limiter le coût des interventions, leur impact sur l'environnement et l'expansion de résistances aux pesticides chimiques employés. Dans ce cadre, une protection efficace des cultures est rendue possible grâce à un couplage de suivis de terrain réguliers à un ou plusieurs outils de prédiction d'apparition d'un stade spécifique du cycle de vie d'un ravageur.

La phénologie, définition et modélisation

La phénologie peut être définie comme la répartition dans le temps des étapes clés du cycle de vie d'une espèce, en synchronie avec les variations de son environnement (température, durée du jour, humidité...). Pour les insectes, les modèles phénologiques ont généralement l'objectif de prédire la date d'éclosion des œufs, l'apparition d'un stade larvaire, l'émergence de l'adulte, ainsi que le nombre de générations par an. Ils offrent donc la possibilité d'estimer, pour une date donnée, la proportion d'individus d'une population qui se situe dans un stade donné du cycle. De telles prédictions requièrent une connaissance de certaines relations qui existent entre l'organisme étudié et son environnement. L'influence de la température sur l'activité biologique et la vitesse de développement est généralement placée au centre de la construction d'un modèle phénologique. En effet, le développement des organismes poïkilothermes (dits « organismes à sang froid ») comme les insectes est principalement sous l'influence de l'énergie thermique disponible dans leur environnement. La notion de « degrés-jour » a été créée afin de traduire cette relation existant entre le développement d'un insecte et la chaleur disponible quotidiennement dans son environnement. Les degrés-jour sont des unités combinant à la fois le temps et la température. La constante thermique correspond au nombre de degrés-jour nécessaire à l'achèvement d'un stade précis du cycle. Le fait que cette constante traduise une exigence physiologique permet de comprendre pourquoi il faut plus de temps à un œuf pour éclore dans un environnement froid que dans un environnement chaud car moins de calories lui sont fournies quotidiennement. Il est à noter cependant que la valeur de la constante thermique peut varier selon le stade considéré (œuf, larve, nymphe...) et l'espèce. Ainsi, si deux espèces A et B sont placées dans un environnement identique et que A possède une constante thermique de développement larvaire supérieure à celle de B, alors A mettra plus de temps que B pour achever son stade larvaire. Lorsque les valeurs de ces constantes thermiques sont connues, leur combinaison avec des relevés quotidiens de températures permet l'estimation du développement d'un insecte d'un stade à un autre de son cycle biologique.

Le modèle phénologique est une construction mathématique intégrant ce type de relations existant entre un organisme et son environnement. Il fournit une représentation plus ou moins simplifiée (selon le degré

de connaissances sur la physiologie de l'espèce) d'une population d'insectes soumise à un régime de températures plus ou moins localisé (selon l'étendue géographique des mesures météorologiques). Par exemple, le calcul du nombre de degrés-jour accumulés entre la date T et la date T+n offre la possibilité de déterminer via le modèle quelle proportion des individus d'une population d'insectes a atteint un stade précis du cycle à la date T+n. Généralement, cette date correspond à la période de l'année à laquelle la question de l'utilité d'une intervention (pesticide, prophylaxie...) se pose, tandis que la date T est couramment appelée « Biofix » et correspond au point de départ annuel du cycle de l'insecte ciblé. L'initialisation du Biofix doit donc être associée, dans le meilleur des cas, à un événement biologique pertinent qui marque l'initiation du cycle saisonnier *in natura*. Pour les insectes dont les phéromones sexuelles ont pu être isolées, le Biofix correspond aux premières captures significatives de mâles au sein d'un réseau de pièges sexuels. La structure interne du modèle phénologique détermine combien de stades du cycle pourront être prédits en réponse aux données de températures injectées à partir de l'initiation du cycle. Le modèle est généralement interrompu après le dernier stade d'intérêt en termes de prévisions.

Dans le cadre de la protection intégrée, la connaissance et la modélisation de la phénologie d'un ravageur représentent un enjeu particulièrement stimulant. A son niveau le plus poussé, on peut donc imaginer un système complet d'information reposant sur : (1) la connaissance de la biologie du ravageur, (2) des suivis localisés et quotidiens de températures, (3) un ou plusieurs modèles phénologiques exploitant ces données, (4) un système informatisé permettant l'intégration des prédictions réalisées et leurs diffusions associées à des préconisations spécifiques et adaptées. Cette démarche a été initiée à l'INRA d'Avignon, en partenariat avec le Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), dans le cadre de la protection contre le carpocapse des pommes.

Carpocapse des pommes et protection en arboriculture fruitière

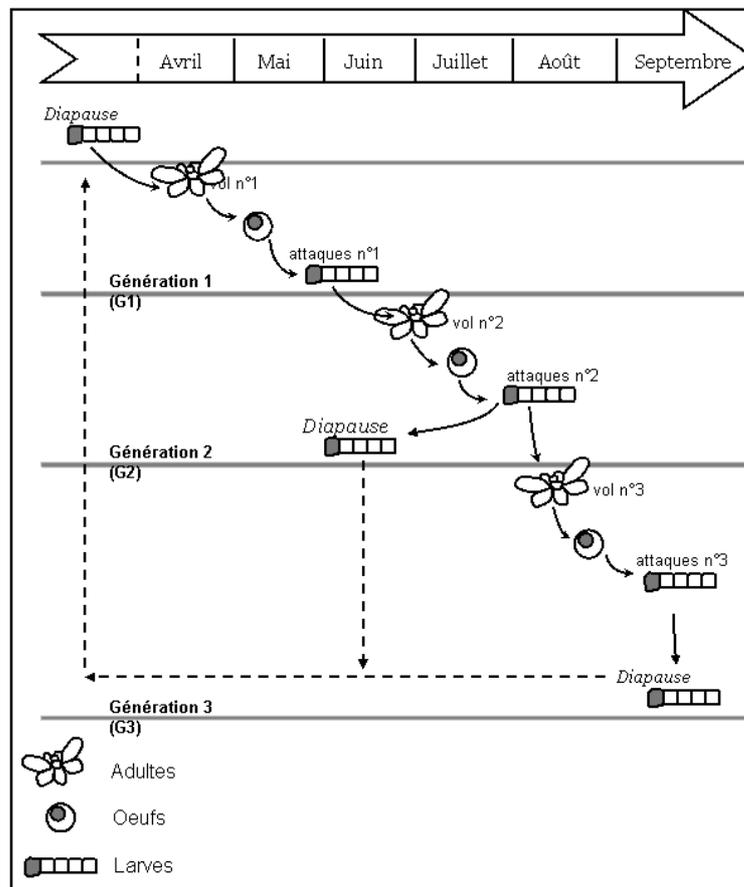
Sur l'ensemble de l'aire de répartition mondiale du pommier cultivé, l'adaptation du carpocapse des pommes, *Cydia pomonella* (L.), à la phénologie de son hôte résulte en une pression parasitaire exercée de la nouaison jusqu'à la récolte, constituant ainsi une contrainte majeure à la production de pommes. Le carpocapse est donc depuis longtemps la cible de traitements chimiques intensifs durant la majorité de sa période de présence en vergers. En conséquence, de nombreuses populations ont développé des résistances aux matières actives les plus fréquemment utilisées, mettant en échec de façon récurrente les stratégies de protection dans le monde entier. Depuis le début des années 90, la majorité des populations de carpocapses du Sud-est de la France a développé des résistances aux différentes classes d'insecticides chimiques (organophosphorés, pyréthrinoïdes, régulateurs et inhibiteurs de croissance d'insectes). Ces résistances omniprésentes représentent un frein majeur à la pérennité du contrôle des populations de ce ravageur. En région P.A.C.A., la plupart des stratégies de gestion de la résistance sont inopérantes sur les populations de carpocapses du fait surtout de la nature croisée de la résistance (un même mécanisme induit une résistance à plusieurs insecticides) qui limite l'effet d'une rotation dans le temps ou dans l'espace de matières actives. De même, l'exigence « zéro dégâts » à la récolte interdit les stratégies de faibles doses ou le développement de zones refuges non traitées pour favoriser la survie d'individus sensibles. Dans ce contexte, nous avons emprunté une nouvelle voie de recherche dans la gestion des populations de carpocapses, à travers l'exploitation de particularités phénologiques associées à certains mécanismes de résistance.

Prendre en compte l'évolution des populations de carpocapses

Dans le Sud-est de la France, la phénologie du carpocapse se caractérise par deux premiers vols d'adultes complets (vols de G1 et G2) et d'un troisième vol partiel (vol de G3) puisqu'une partie des larves issues du vol de G2 entre en diapause et n'émergera qu'au printemps suivant (Figure 1). La

diapause correspond à un ralentissement très net de l'activité biologique d'un insecte qui interrompt le développement à un stade précis du cycle (le dernier stade larvaire chez le carpocapse). Ce phénomène est en fait une réponse physiologique à l'existence d'une saison défavorable au développement (l'hiver), généralement associée à des températures trop basses et une absence totale de ressources alimentaires (pommes récoltées ou en décomposition). La diapause est induite majoritairement chez les jeunes larves au milieu de l'été par la décroissance de la durée du jour (photopériode) et la maturation des fruits, deux signes avant-coureurs fiables de la proximité d'une saison défavorable. La femelle adulte de chaque génération dépose des œufs à la surface de la pomme ou sur les feuilles environnantes, puis la larve néonate (qui vient d'éclore) dite « baladeuse » pénètre dans le fruit pour y consommer les pépins ; le fruit n'est alors plus commercialisable. Bien que les générations de larves ne produisent pas toutes un vol d'adultes, chacune d'entre elles occasionne bien entendu des dégâts. Les cibles des traitements insecticides effectués contre le carpocapse sont donc les œufs et les larves néonates baladeuses puisque celles-ci échappent aux toxiques une fois à l'intérieur de la pomme.

Figure 1 : Cycle saisonnier (phénologie) du carpocapse des pommes dans le Sud-est de la France. On observe trois vols d'adultes qui produisent trois générations de larves qui attaquent les pommes dès leur éclosion des œufs.



La résistance aux insecticides s'accompagne fréquemment d'effets secondaires (ou effets pléiotropes) qui résultent d'interférences fortes entre l'expression des mécanismes de résistance et des fonctions physiologiques essentielles à l'organisme. Certains mécanismes de résistance sont associés à une production anormalement élevée d'enzymes impliquées dans la dégradation des composés toxiques

pénétrant le corps de l'insecte. L'énergie impliquée dans la production d'une telle quantité de protéines ne peut alors plus être distribuée à d'autres fonctions physiologiques telles que la reproduction ou la croissance. Les individus résistants sont ainsi susceptibles d'être moins performants. D'autres mécanismes peuvent être associés à des modifications de la structure de protéines impliquées dans le système nerveux, si bien que son fonctionnement normal peut en être altéré. Ceci peut causer des dysfonctionnements responsables d'une réduction des capacités de réaction de l'insecte résistant vis-à-vis de son environnement. Dans les deux cas, il apparaît donc que ces effets secondaires de la résistance aux insecticides peuvent constituer un handicap face à des individus sensibles, dont la physiologie n'est pas altérée, lors d'interruptions des traitements insecticides. Si ce handicap se traduit par une décroissance de la fréquence des individus résistants dans le temps une fois les traitements arrêtés, on parle généralement de « coût de la résistance aux insecticides ».

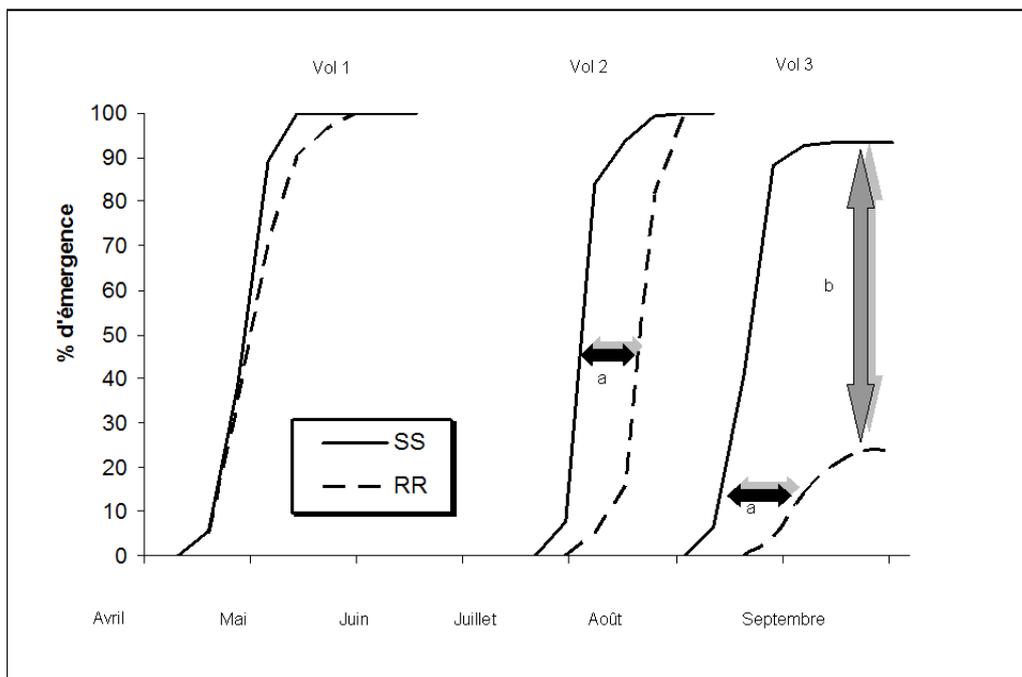
Chez le carpocapse, les principaux mécanismes de résistance correspondent à un accroissement de l'activité d'enzymes impliqués initialement dans la dégradation des molécules provenant du milieu extérieur (entrées par le tube digestif ou le tégument), mais qui interviennent également dans les processus de régulation hormonale. La suractivité de ces enzymes permet donc de dégrader plus efficacement les insecticides ingérés, mais, en contrepartie, elle perturbe profondément le fonctionnement hormonal. Nous avons pu mettre en évidence que cela résulte en une altération de la physiologie qui se traduit par une moindre fécondité, une constante thermique de développement larvaire plus élevée (soit un développement larvaire plus long) et une induction par la photopériode de la diapause plus précoce chez les individus résistants que chez les sensibles. Par voie de conséquence, il était donc probable que l'écologie de ces individus résistants soit également perturbée puisque le développement larvaire et la diapause sont des composantes biologiques prépondérantes pour la phénologie. De plus, dans la mesure où le développement larvaire détermine la durée de la transition entre deux générations, il était également possible que la fraction résistante d'une population de carpocapses montre un retard phénologique par rapport à une fraction sensible qui se développe plus rapidement. C'est dans ce cadre que nous avons testé si les divergences observées sur le plan de la physiologie pouvaient effectivement résulter en des divergences dans la phénologie de carpocapses sensibles et résistants aux insecticides.

Pour ce faire, l'ensemble du cycle phénologique du carpocapse a été reproduit en 2001 au centre INRA d'Avignon, en conditions naturelles de lumière et de température sous un insectarium extérieur. Nous avons analysé les dates d'émergences d'adultes correspondant aux vols de G1, G2 et G3 ainsi que la proportion de larves de G2 entrant en diapause, chez des individus sensibles et résistants aux insecticides (Boivin *et al.*, 2003). Les résultats ont montré que le ralentissement du développement larvaire chez les individus résistants résulte en un retard significatif de leurs dates d'apparition durant le vol de G2 par rapport à celles d'individus sensibles, et que ce retard s'accroît au cours du vol de G3 (Figure 2). Il est apparu également que la proportion de larves de G2 entrant en diapause (ne participant donc pas au troisième vol) au cours de l'été était significativement plus importante chez les individus résistants (66%) que chez les individus sensibles (7%). Ce phénomène traduit le fait que le vol de G3 fréquemment observé en vergers doit être probablement constitué d'une grande majorité d'individus sensibles aux insecticides, et que la plus forte proportion des individus résistants de la G2 n'émergeront qu'au printemps suivant.

On assiste donc à une séparation dans le temps des individus résistants et sensibles d'une même population de carpocapses. Ce phénomène a été qualifié de « ségrégation phénologique » des gènes de résistance. Par ailleurs, les divergences observées au niveau de la diapause, qui influence directement la durée du cycle saisonnier, soulignent que ces individus sensibles et résistants ont tendance à effectuer respectivement deux et trois vols d'adultes par saison. D'un point de vue pratique, ce phénomène de ségrégation phénologique a ouvert une voie de réflexion inédite sur les modalités de gestion des populations de carpocapses et de leurs résistances aux insecticides. En effet, la modélisation, et donc la prévision, de la phénologie de fractions sensibles et résistantes d'une même

population de carpocapses permettrait d'ajuster les méthodes de protection disponibles au statut de la population vis-à-vis de la résistance à un instant donné de la saison. Dans le contexte très contraignant qu'impose la résistance aux insecticides en protection intégrée, nos recherches souhaitent promouvoir une optimisation des méthodes actuelles encore efficaces.

Figure 2 : Ségrégation phénologique de carpocapses des pommes adultes homozygotes sensibles (SS) et résistants (RR) (a) et impact de la résistance sur le voltinisme (b) en 2001. Des durées de développement larvaire plus longues entraînent un retard d'apparition des deuxièmes et troisièmes vols d'adultes (ici les pourcentages cumulés d'émergence d'adultes). Chez les larves RR issues du deuxième vol, une apparition plus tardive et une sensibilité plus précoce à l'induction de la diapause par la photopériode résulte en une propension à la diapause plus forte limitant de façon significative leur abondance au cours du troisième du vol.

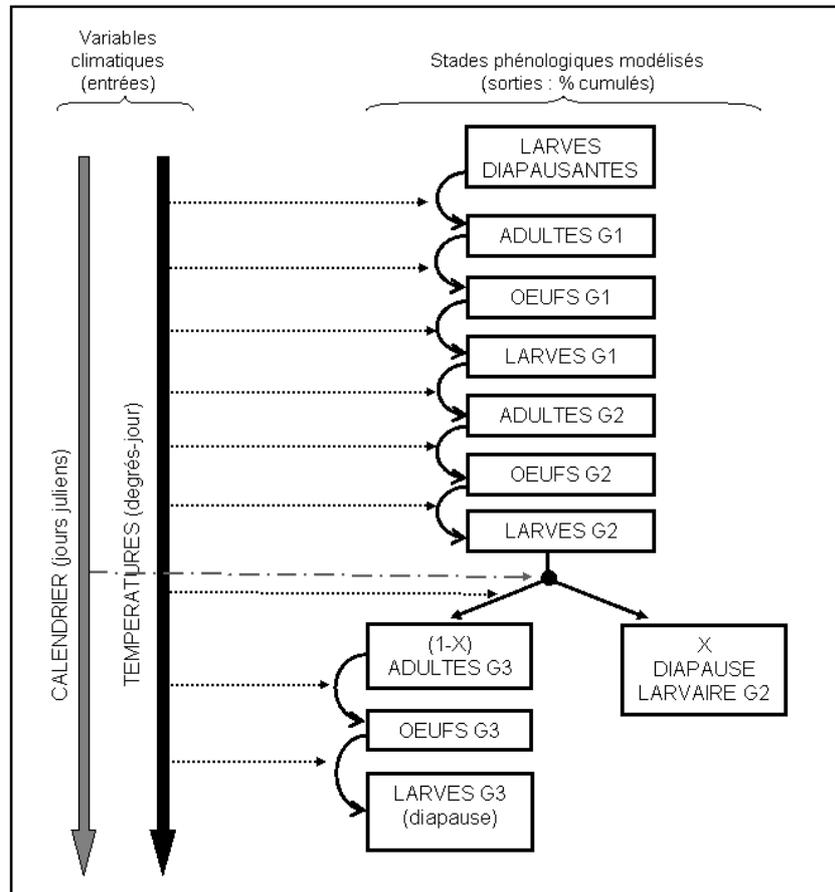


Modélisation de la phénologie du carpocapse

Le succès d'une stratégie de protection basée en partie sur de la modélisation est fortement dépendant du degré de représentativité du modèle construit vis-à-vis de la phénologie des populations cibles. Jusqu'à aujourd'hui, le carpocapse a fait l'objet de nombreuses études ayant permis d'élaboration de plusieurs modèles phénologiques dans le monde (Etats-Unis, France, Allemagne, Suisse) sans que la résistance aux insecticides et ses effets potentiels sur l'écologie de l'insecte n'aient été considérés. La prédiction des risques d'infestation par des carpocapses sensibles et résistants représente à présent un enjeu pertinent pour pérenniser le contrôle des populations de ce ravageur, dont il semble indispensable de prendre en compte l'évolution. En ce sens, la prise en compte des effets pléiotropes de la résistance sur la phénologie du carpocapse prend toute son importance si l'on veut s'attacher à prédire fidèlement l'évolution saisonnière de populations composées en moyenne de 75% d'individus résistants en P.A.C.A. (Sauphanor *et al.*, 2000).

Figure 3 : Représentation schématique du modèle phénologique du carpocapse des pommes. Le modèle utilise comme variables d'entrée des degrés-jour accumulés quotidiennement et les jours juliens

du calendrier pour déterminer les vitesses de transition entre les différents stades phénologiques constituant les sorties du modèle. En réponse aux variables climatiques, le modèle fournit ainsi un pourcentage cumulé estimant une proportion de la population ayant atteint un stade donné du cycle à un jour donné de l'année. Les taux de transition entre chaque stade phénologique sont déterminés par des fonctions mathématiques dont les paramètres diffèrent entre individus sensibles et résistants aux insecticides.



A partir des connaissances établies sur la phénologie de carpocapses sensibles et résistants, nous avons pu estimer des paramètres associés aux caractéristiques biologiques qui diffèrent entre individus sensibles et résistants. Ceci a permis la modélisation d'étapes du cycle saisonnier (émergences des adultes, ponte des œufs, développements embryonnaire et larvaire, et induction de la diapause) jugées pertinentes pour le pilotage de la lutte. La compilation de ces étapes a conduit à l'élaboration d'un nouveau modèle phénologique avec lequel il est possible de simuler l'ensemble du cycle annuel du carpocapse. Ce modèle probabiliste est gouverné par deux variables climatiques : la température (maximum et minimum quotidiennes depuis le 1^{er} janvier) pour son influence sur le développement et la cinétique de ponte des femelles, et la photopériode (résumée par les jours juliens du calendrier) pour son influence sur la cinétique d'entrée en diapause (Figure 3). Ainsi, le modèle estime pour un jour donné et pour chacune des trois générations les pourcentages d'adultes ayant émergé, d'œufs pondus, de larves ayant éclos et de larves entrées en diapause. Son intérêt est qu'il permet des simulations distinctes des évolutions saisonnières de fractions sensibles et résistants d'une population de carpocapses en modifiant la valeur des paramètres d'entrée, c'est-à-dire en attribuant à ces paramètres des valeurs de type « Sensible » ou « Résistant » (Boivin *et al.*, 2005). La mise en parallèle des sorties des modèles Sensible et Résistant répondant à un même jeu de données climatiques reproduit le phénomène de ségrégation phénologique observé chez les insectes sous insectarium et en vergers.

Nous avons donc mis au point un outil de prévision des risques adapté à l'évolution de la structure des populations de carpocapses. Par définition, ce modèle probabiliste ne peut cependant fournir aucune estimation de taille de population, c'est-à-dire aucun nombre attendu de carpocapses, dans une localité donnée. Il est donc important de noter que l'interprétation de chaque pourcentage prédit est à réaliser à la lumière des observations et de l'historique connu d'infestation en vergers.

Perspectives pour la gestion des populations de carpocapses

Dans le cas du carpocapse des pommes, les traitements insecticides sont ciblés sur les stades sensibles que sont l'œuf et la larve fraîchement éclos (néonate), avant sa pénétration dans le fruit. Le raisonnement de la protection passe par la connaissance précise de la période d'occurrence de ces stades, dont la définition peut résulter de l'observation en vergers ou de la modélisation.

Observations. Des contrôles visuels périodiques en vergers permettent en théorie de renseigner sur les dates de ponte ou d'éclosion des larves (observation des dégâts sur fruits). Ces observations étant délicates ou coûteuses, la prévision des périodes de risque à l'échelle de la parcelle recourait au cours des deux précédentes décennies au piégeage des adultes au moyen de phéromones sexuelles de synthèse. Les captures renseignent sur les dates d'émergence des adultes de chaque génération, ainsi que sur les premières pontes qui interviennent dans les 48h suivant l'émergence. Le couplage des observations avec une station météorologique renseigne également sur les éclosions de larves, intervenant en moyenne 90 degrés-jour (en base 10°C) après la ponte. Ces observations permettent le raisonnement de la protection à l'échelle de la petite région lorsqu'elles sont réalisées dans le cadre d'un réseau d'observation, ou de la parcelle lorsqu'elles sont réalisées par l'exploitant. Dans ce cas, l'intensité du risque peut être évaluée sur la base de seuils de captures hebdomadaires. La fréquence de ce mode de raisonnement est aujourd'hui fortement réduite, du fait notamment de la perturbation du fonctionnement des pièges sexuels par la proximité de parcelles en confusion sexuelle (homologuée en France contre le carpocapse depuis 2000).

Modélisation. Couplé avec une station météorologique, le modèle phénologique carpocapse donne une représentation théorique de l'occurrence des stades cibles (œuf et néonate). En France, le service de la protection des végétaux (SPV) diffuse par le canal des avertissements agricoles une prévision régionale des risques d'infestation par le carpocapse basée sur ce type de modèle. En l'absence d'information complémentaire sur le niveau de population de la parcelle, le pilotage de la protection via le modèle se restreint à la délimitation dans le temps des périodes de risque et à leur intensité relative. Une intensification de la protection est requise pendant les périodes de fort risque de chaque génération (le pic de ponte ou le pic d'éclosion des œufs selon qu'on applique des ovicides ou des larvicides), une protection moins intensive par ralentissement de la cadence de traitements étant recommandée en dehors de ces périodes à haut risque (début ou fin des périodes d'éclosion des œufs de chaque génération). La stratégie de protection préconisée au niveau national est le recours préférentiel à la confusion sexuelle, qui couvre toute la période de risque jusqu'à la récolte, complétée en cas de forte pression par un à deux traitements pendant les périodes à haut risque des deux premières générations. Le positionnement de ces traitements complémentaires est défini à partir du modèle phénologique. Mais le paramétrage initial de ce modèle, de même que celui des autres modèles carpocapses disponibles au niveau mondial ou de l'ensemble des modèles de dynamique des populations d'insectes ravageurs des cultures, est basé sur les traits de vie de populations sensibles aux insecticides. Or nous avons vu ici que les sorties de ces modèles ne reflètent plus fidèlement la phénologie d'insectes devenus majoritairement résistants. L'intérêt de notre démarche est qu'elle favorise une distinction des proportions respectives d'individus sensibles et résistants présents à une date donnée, grâce à un paramétrage prenant en compte le statut des populations de carpocapses vis-à-vis de ces résistances. De fait, elle pourrait contribuer à la définition de nouvelles stratégies de

gestion des populations et des résistances, tout d'abord comme outil d'aide à la décision pour la répartition temporelle des différents moyens de lutte (insecticides chimiques, microbiologiques, confusion sexuelle). Parmi ces stratégies, on peut envisager un ciblage préférentiel d'interventions chimiques efficaces sur les périodes à forte occurrence des fractions résistantes, combiné à une protection alternative sur l'ensemble de la période de risque favorisant le contrôle de la fraction sensible. Une telle stratégie contribuerait à limiter la pression de sélection exercée par les insecticides chimiques en ménageant des périodes refuges pour les insectes sensibles (assimilable à la stratégie « haute dose / refuge » actuellement développée pour les résistances de plantes aux insectes). Le résultat attendu est un maintien du contrôle des niveaux de populations, tout en limitant l'expansion de résistances aux insecticides dans les bassins de production (Boivin et Sauphanor, 2005).

L'intérêt de la profession pour un tel modèle a motivé l'établissement d'une convention tri-partite entre l'INRA, le CTIFL et le SRPV pour rendre ces prévisions accessibles aux groupements techniques et conseillers agricoles. Un prototype de ce modèle est actuellement installé sur la plate-forme Fruits et Légumes du CTIFL, et fait l'objet sur une période de 3 ans (2006-2008) d'une validation associant différents acteurs du développement.

Dans le contexte actuel de retrait des homologations des insecticides les plus utilisés sur carpocapse et d'un objectif de réduction de 50% de l'utilisation des pyréthriinoïdes et des organophosphorés encore homologués contre ce ravageur, la gestion des résistances aux quelques molécules encore actives est d'une importance cruciale. Il en est de même pour la durabilité des nouvelles molécules en cours d'introduction. Sur les 8 à 15 traitements appliqués annuellement sur cette espèce dans le sud de la France, le nombre d'applications annuelles de ces nouvelles molécules est aujourd'hui limité à 2 ou 3, soulignant l'importance d'une définition des périodes de risque la plus précise possible. L'application judicieuse de ces méthodes de prévision du risque et de gestion des résistances, associée à des implantations et conduites de vergers moins favorables aux bioagresseurs, assurera le maintien du revenu des producteurs.

Références bibliographiques

- Boivin T., Bouvier J.C., Beslay D., Sauphanor B., 2003. Phenological segregation of insecticide-resistant genotypes in the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae): a case study of ecological divergences associated with adaptive changes in populations. *Genetical Research* 81: 169-177.
- Boivin T., Chadœuf J., Bouvier J.C., Beslay D., Sauphanor B., 2005. Modelling the interactions between phenology and insecticide resistance genes in the codling moth *Cydia pomonella*. *Pest Management Science* 61: 53-67.
- Boivin T., Sauphanor B., 2005. Modélisation de la phénologie du carpocapse des pommes : intégrer la résistance aux insecticides. *Phytoma* 581 :25-27.
- Pimentel D., 1997. Pest Management in Agriculture in *Techniques For Reducing Pesticide Use*. Edited by David Pimentel, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Sauphanor B., Brosse V., Bouvier J.C., Speich P., Micou A., Martinet C., 2000. Monitoring resistance to diflubenzuron and deltamethrin in French codling moth populations. *Pest Management Science* 56: 74-82.