

Conception d'itinéraires techniques pour une protection intégrée en arboriculture

B. Sauphanor, F. Lescourret

INRA, UR 1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine Saint-Paul, site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9

Résumé

Les problèmes phytosanitaires du verger sont importants en raison d'une pression antiparasitaire intense, en lien notamment avec l'exigence de qualité visuelle de la production et avec l'évolution concomitante des bioagresseurs. Faire face à ces problèmes tout en étant attentif à la préservation de l'environnement suppose de concevoir des itinéraires techniques pour la protection intégrée. Dans cette contribution, nous exposons les différentes voies de cette conception: la définition de règles de choix culturaux, la conception expérimentale et la conception assistée par modèles. Puis nous nous appuyons sur des travaux achevés et en cours pour illustrer les différents ingrédients de la conception d'itinéraires techniques. Il s'agit d'abord de l'analyse des pratiques de protection en place, qui peut interroger sur le suivi des préconisations et la compatibilité entre valeur écologique et efficacité. Il s'agit ensuite de la mise au point de règles de choix culturaux, illustrée par des techniques participant à la lutte culturale. Le troisième ingrédient est l'étude de l'effet sur le parasitisme de pratiques comme la conduite de l'arbre, l'irrigation, la taille et la fertilisation azotée. Le quatrième est l'évaluation des coûts des systèmes techniques et de leur impact sur la biodiversité, illustrée à l'aide de groupes biologiques différents. Le dernier ingrédient est la modélisation de populations en interaction, illustrée par l'exemple des liens entre pêches et monilioses sous l'influence d'opérations culturales. Nous concluons sur les aspects à développer : manipulation de l'architecture des arbres, compréhension de réseaux trophiques complexes, prise en compte de l'échelle « paysage ».

La situation particulière du verger

Le verger est un système pérenne et sous ses formes actuelles fortement anthropisé. Ce milieu naturel modifié force la présence d'une plante cultivée, et s'oppose à la concurrence des phytophages et pathogènes. À côté de la performance agronomique, la régulation des populations de bioagresseurs y est une préoccupation centrale car elle est liée à l'objectif économique de production et à l'objectif de qualité des fruits. Cet objectif de qualité se décline non seulement en termes de qualité gustative, mais aussi et surtout en termes de qualité visuelle, selon les critères actuels du marché. Or, cette qualité visuelle est affectée par le parasitisme. La pression antiparasitaire est donc très intense. A cette perturbation majeure que constitue l'élimination d'un échelon trophique, s'ajoute l'altération des communautés d'auxiliaires lorsqu'on recourt à la protection chimique.

Compte tenu des problèmes environnementaux provoqués par l'intensité de la protection chimique en vergers (Aubertot *et al.*, 2005), le raisonnement des interventions a été assez tôt objet de réflexion. Cependant, les progrès prometteurs à cet égard, amorcés dans les années 1980, se sont vus contrer par l'évolution des bioagresseurs ainsi que par une exigence croissante de réduction des coûts de production. Par « évolution des bioagresseurs », nous entendons notamment l'adaptation des espèces, qui est potentiellement à même de s'opposer à des voies de protection aussi bien chimiques (résistance aux insecticides) que biologiques (résistance aux agents de lutte biologique) ou culturales (adaptation

aux variétés résistantes, par exemple). La pérennité du système verger et la concentration dans des bassins de production engendrent des conditions stables et des traitements répétés, qui concourent à cette adaptation. La mise en oeuvre de techniques de protection alternatives ou du raisonnement de la lutte chimique autorise des progrès, mais elle ne permet pas de faire face à tous ces problèmes et à toutes ces exigences. Une réflexion plus générale sur la conception de systèmes de protection intégrée est désormais nécessaire. S'appuyant sur des étapes et des outils méthodologiques, elle est attentive à l'ensemble des interactions au sein des communautés biologiques du verger (comprenant les arbres fruitiers) et de leur modulation par la gestion des cultures et des paysages au-delà de la seule protection phytosanitaire.

Dans ce qui suit, nous exposerons les voies possibles pour la conception d'itinéraires techniques pour la protection intégrée en arboriculture, en nous appuyant sur des principes généraux issus de la réflexion des agronomes (au sens large du terme ; Doré *et al.*, 2006). Nous évoquerons ensuite les étapes nécessaires à cette conception, que l'on peut plutôt qualifier « d'ingrédients » dans la mesure où elles ne se succèdent pas forcément. Nous illustrerons cette partie par des travaux réalisés dans le cadre de programmes Inra achevés (« Production Fruitière Intégrée », « Protection Intégrée des Cultures ») ou de programmes Inra ou ANR en cours (« ECOlogie et GEStion des Ressources », « Agriculture et Développement Durable ») et d'actions financées par le MEDD (nouvellement MEDAD). Dans une dernière partie, nous évoquerons des aspects plus prospectifs qui nous semblent particulièrement importants à développer pour la conception de systèmes de protection intégrée en arboriculture.

Différentes voies de conception d'itinéraires techniques

La conception de systèmes de protection intégrée, comme la conception de systèmes techniques en général, repose sur deux niveaux de réflexion. Le premier niveau concerne le renouvellement des techniques. C'est le niveau le plus immédiat, le plus « classique ». Le développement de méthodes de lutte directe spécifiques, un positionnement temporel ou spatial intelligent des traitements chimiques, un agencement spatial de variétés optimisant la défense contre un bioagresseur ou les règles d'un mode de conduite d'arbres fruitiers défavorable au développement d'un parasite relèvent de ce niveau de réflexion. Le deuxième niveau de réflexion concerne l'association entre techniques culturales. Ceci va véritablement dans le sens de la protection « intégrée ». Il faut bien noter que l'association entre techniques ne se résume pas à un simple effet « additif ». L'application des techniques modifie des états des plantes, des bioagresseurs, du milieu, qui participent à des processus complexes concourant à l'élaboration des performances du système verger. Ces processus sont marqués par des interactions, des rétroactions, des effets de synergie et d'hystérésis. Ce niveau de réflexion se rapproche de la notion d'itinéraire technique et aussi de système de culture, qui associe dans son acception la plus complète les itinéraires techniques de la campagne à une vision temporelle plus longue qui correspond à la prise en compte des rotations ou, dans des systèmes pérennes comme les vergers, aux choix de plantation et au vieillissement des plantes.

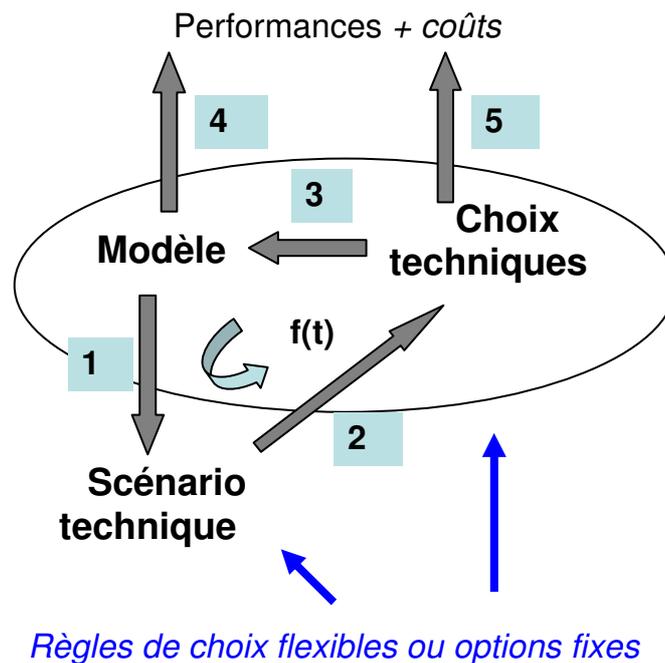
Il y a plusieurs voies possibles pour la conception de systèmes de protection intégrée. Là encore, le propos s'applique aux systèmes techniques en général, même si nous l'illustrons dans le cas de la protection intégrée. De fait, une vision globale des systèmes techniques est quasiment obligatoire. On est conduit, en effet, à raisonner plus « production intégrée » que « protection intégrée », à ne pas dissocier les différents types de performance du verger dans le raisonnement des objectifs, non plus que dans le raisonnement des techniques... Et, en conséquence, on est conduit à ne plus dissocier techniques « strictement de protection » et « autres techniques », ces autres techniques pouvant du reste contribuer à la protection... la preuve en est que l'on parle de « lutte culturale » !

Ces voies sont plus complémentaires qu'antagonistes, comme nous allons le voir. *La première est la conception de règles de choix culturaux.* Le positionnement temporel de traitements chimiques

s'appuyant sur la double considération de la phénologie des plantes et des bioagresseurs et sur des notions comme le « seuil d'intervention » relève de ce registre de conception, tout comme les règles d'un mode de conduite des arbres conduisant à une architecture défavorable à tel ou tel parasite. *La conception expérimentale est la deuxième voie.* Dans son acception la plus classique, la conception expérimentale utilise des options techniques fixées. Dans une acception renouvelée, la conception expérimentale peut utiliser des règles de choix cultural et notamment des règles de type Si... tel état de la culture, du sol, de l'attaque parasitaire, Alors... telle option technique (Meynard *et al.*, 1996, Reau *et al.*, 1996). Cependant, dès lors qu'on s'intéresse de manière exploratoire à la combinaison d'un nombre élevé d'options ou de règles techniques (ne serait-ce qu'en considérant plusieurs des actes techniques qui jalonnent le cycle d'une culture), la mise en œuvre de la voie strictement expérimentale peut être extrêmement lourde et compliquée, tout comme l'interprétation de ses résultats. Un autre problème est celui de la reproductibilité des résultats expérimentaux. Pour dépasser ces problèmes, la communauté internationale des agronomes au sens large propose une *conception assistée par modèles.* C'est la *troisième voie de conception.* Attention, ce type de conception n'est pas destiné à se substituer à l'expérimentation, mais à mieux la cadrer. Elle vise à remplacer une expérimentation exploratoire coûteuse par une expérimentation plus ciblée, concernant *a priori* des scénarios intéressants. Il n'y a donc pas antagonisme entre conception expérimentale et conception assistée par modèles. La conception assistée par modèles fait l'objet d'une réflexion approfondie notamment en Australie (CSIRO), aux Pays-Bas (Université de Wageningen) et en France au sein de l'INRA. Jusqu'à une date récente, la performance majeure considérée par les chercheurs de cette école de pensée a été le rendement des cultures, mais l'évolution des besoins conduit à considérer d'autres performances comme la qualité des produits et le risque parasitaire. Comme suggéré plus haut, c'est du reste l'association de ces différentes performances, auxquelles il faudrait ajouter des critères économiques (et notamment les coûts liés aux temps de travaux, très pénalisants en arboriculture) et environnementaux, qui prend du sens en regard de la notion de durabilité de l'agriculture.

La conception de systèmes techniques assistée par modèles peut prendre des formes diverses. Nous décrivons ci-après la forme la plus « complète » de ce type de conception, basée sur un dialogue étroit entre un modèle dynamique et des scénarios techniques qui peuvent être vus comme des ensembles de règles de choix flexibles (de type Si... Alors, à la parcelle et pour la campagne) ou des options de gestion fixes (comme l'allocation de cultures). Cette définition des scénarios techniques montre au passage que la conception de règles de choix culturaux est capable d'alimenter la conception assistée par modèles, de la même manière qu'elle est capable d'alimenter la conception expérimentale. Les scénarios doivent être cadrés par les contraintes techniques incontournables à identifier (tours d'eau en lien avec un système d'irrigation, par exemple, qui contraignent fortement la protection) mais notre sentiment est que dans une démarche de recherche ils ne doivent pas être bridés par les contextes économiques actuels et doivent rester prospectifs.

Figure 1 : Dialogue entre modèle et scénarios techniques au cours d'une simulation, pour la conception assistée par modèles. Si les scénarios sont des règles de choix flexibles de type *Si Alors*, au cours d'une simulation, le modèle établit les conditions qui déclenchent l'application de ces règles (1), et les résultats de cette application (2) sont des choix techniques qui participent à l'étape suivante (3). Les résultats sont à la fois des performances simulées (4) et des coûts de production induits par le scénario simulé (5) qui seront les critères d'évaluation. Si les scénarios sont des règles fixes (comme l'allocation de cultures, le type de gestion des bords de champ), on démarre à l'étape 3.



La sanction de ce dialogue entre modèle et scénario est une évaluation avec pour critères un profil de performances. Les étapes de la démarche sont la simulation de scénarios, l'optimisation ou le classement de ces scénarios, et la mise à l'épreuve du ou des « meilleurs » scénarios, si possible en vraie grandeur. On retrouve là la démarche expérimentale (qui est également indispensable pour la construction du modèle lui-même !). Le classement, pour lequel il existe des méthodes multicritères, est bien adapté à une gamme raisonnable de scénarios candidats, l'optimisation à des cas de simulations intensives dans de larges gammes de contextes (climatiques notamment).

Quels ingrédients pour la conception d'itinéraires techniques à visée de protection intégrée en vergers ?

Nous identifions cinq « ingrédients » pour une démarche de recherche propre à construire des itinéraires techniques pour une protection intégrée en arboriculture. *Le premier est l'analyse des pratiques « en place »*. Comment, en effet, imaginer des systèmes nouveaux sans s'appuyer sur ce qui se fait ? Cette phase d'analyse peut concerner la caractérisation des pratiques existantes, leur évaluation, l'identification des techniques « clé », des marges de progrès possible, des contraintes techniques ou d'un autre ordre... L'identification des indicateurs de pilotage utilisés par les arboriculteurs appartient aussi à cette phase, car l'aménagement de règles techniques peut en profiter ainsi que la conception de nouvelles règles (objectivation d'indicateurs utilisés, mise au point

d'indicateurs utilisables). Encore ne parlons-nous ici que du point de vue des disciplines biotechniques. Les sciences humaines, hors du champ de la présente contribution, participent à l'analyse des pratiques en place en expliquant les trajectoires individuelles ou collectives (Paratte 2004) et en permettant de réfléchir aux freins et leviers à l'adoption de méthodes nouvelles (Toubon 1999). *Le deuxième ingrédient est la conception de règles de choix culturaux* que nous avons déjà évoquée, qui peut justement s'appuyer sur la proposition d'indicateurs de pilotage. *Le troisième ingrédient est l'étude de l'effet des pratiques sur le parasitisme*. Nous privilégierons dans nos exemples l'effet de pratiques autres que la lutte chimique, qui peuvent participer à la régulation des bioagresseurs. *Le quatrième ingrédient est l'évaluation des coûts des systèmes techniques concourant à la protection, et de leur impact sur la biodiversité*. Nous avons insisté précédemment sur le côté pluriel de la performance du système verger. Le maintien de la biodiversité est un des aspects cruciaux de cette performance. Les communautés biologiques se caractérisent par leur composition spécifique, leur diversité, et leur organisation fonctionnelle, composantes de la biodiversité. L'intégrité des milieux résulte de cette biodiversité, et conditionne leur capacité de résistance et de résilience lorsque surviennent des perturbations occasionnelles. L'hypothèse biodiversité - productivité - durabilité des milieux est aujourd'hui abondée par différentes approches, de la modélisation aux observations en milieu réel, en passant par des expérimentations en mésocosme. *Le cinquième ingrédient est la modélisation de populations ou de « populations en interaction »*. Ce terme recouvre la modélisation de la phénologie ou de la dynamique des populations de bioagresseurs, mais aussi celle de réseaux trophiques plantes - bioagresseurs - auxiliaires (ennemis naturels ou introduits). La modélisation permet de réfléchir de manière cadrée aux associations de pratiques capables de contribuer à la protection / production intégrée (*via* les liens entre les processus sous-jacents, qu'elles modulent), et peut constituer un outil formel de la conception de systèmes techniques, comme nous l'avons vu.

Analyse des pratiques

Nous n'illustrerons que de manière très partielle cette phase dont la vocation peut être très large (cf. supra), en soulignant tout de même qu'en matière de protection phytosanitaire les analyses précises des pratiques, notamment en termes de calendrier, sont rares. Nous utiliserons pour cela deux travaux très récents.

Le premier travail (Pevern *et al.*, 2007) concerne l'analyse des stratégies de protection contre les pucerons en vergers de pêchers. A partir d'enquêtes ouvertes auprès de techniciens et de producteurs, de collectes de calendriers phytosanitaires, et de suivis parcellaires visant à mesurer l'efficacité des stratégies par le degré d'infestation et les conséquences des pratiques sur la faune auxiliaire, quatre grandes stratégies ont été identifiées. On peut les ordonner selon un gradient d'écologisation : une protection chimique intensive et systématique (1), une protection chimique raisonnée et curative (2), une protection alternative intensive (3) et une protection intégrée (4). Les stratégies 1 et 2 sont les plus efficaces en termes de limitation de l'infestation de pucerons. Seul le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* y est présent et ses populations sont bien maîtrisées. En revanche, les stratégies 3 et 4, concernant surtout des exploitations en agriculture biologique (AB), sont les plus respectueuses de la faune auxiliaire. *M. persicae* y est remplacé par d'autres espèces de pucerons, en effectifs assez élevés. Ce type de travail ouvre un domaine de recherches sur la question de la compatibilité entre « valeur écologique » et efficacité des stratégies de protection phytosanitaire.

Le second travail (Picard, 2007) concerne l'analyse temporelle des pratiques de protection contre le carpocapse des pommes, un des principaux ravageurs des vergers de pommiers et de poiriers. L'étude a été basée sur des relevés de calendriers phytosanitaires, et, parallèlement, sur des relevés d'effectifs de carpocapse (par piégeage) dans 70 parcelles de pommier et poirier du Sud-est de la France, tirées au hasard dans une zone de référence. Les parcelles étaient classées *a priori* dans l'un des trois grands types de stratégies de lutte contre le carpocapse rencontrées dans la zone : utilisation de la confusion sexuelle, sous cahier des charges AB, protection chimique exclusive. L'analyse indique que

les arboriculteurs utilisant la confusion sexuelle positionnent leurs traitements chimiques additionnels selon les préconisations Inra-SRPV de protection contre le carpocapse. La protection insecticide y est moins intense que dans les deux autres modalités, sans toutefois être modulée en fonction de l'intensité du risque. En revanche, les arboriculteurs sous cahier des charges AB et en lutte conventionnelle ne semblent pas suivre ces préconisations. Sous l'hypothèse que ces résultats se confirment à l'examen d'autres échantillons, il convient de rechercher le déterminisme de cet écart entre pratiques et préconisations, en s'interrogeant notamment sur les contraintes induites par les autres actes techniques nécessaires à la conduite des vergers.

Conception de règles de choix culturaux

Pour illustrer les règles de choix culturaux, nous choisissons volontairement des techniques orientées vers la production intégrée au-delà de la seule protection. Un prototype d'itinéraire technique en verger de pêchers a été élaboré (Plénet *et al.*, 2006), qui est basé sur la combinaison de règles de conduite en branche fruitière et de règles de gestion de l'irrigation. La conception de la conduite du pêcher en branches fruitières se situe dans le cadre du groupe MAFCOT – Maîtrise de la Fructification : concepts et techniques (Lauri et Lespinasse, 1999)- qui s'est donné pour objectif de mettre au point des techniques permettant d'accompagner la croissance des arbres vers des équilibres fonctionnels plutôt que de la contraindre vers des formes fruitières fixées. Les règles mises au point pour le pêcher, qui comprennent notamment l'arrachage manuel des pousses dans les zones à réitération, visent à améliorer la pénétration de la lumière au sein du couvert et à répartir la croissance végétative de façon plus équilibrée qu'en conduite conventionnelle, où on assiste à un excès de vigueur provoquant un auto-ombrage très défavorable à la qualité des fruits et par contre favorable au développement de maladies telles que les monilioses. Cette gestion de l'arbre et du complexe parasitaire qui lui est associé est en très forte interaction avec la gestion des intrants et notamment de l'eau. Le pilotage des apports d'eau doit permettre de moduler la croissance en fonction du développement du végétal et également de diminuer la sensibilité aux maladies de conservation, sachant l'influence reconnue des facteurs microclimatiques et notamment de l'humidité sur le développement de ces maladies. L'utilisation d'indicateurs du statut hydrique des arbres (fluctuations micromorphométriques de branches) comme outils pour ce pilotage des apports d'eau est possible grâce au système Pépista mis au point par l'Inra (Huguet *et al.*, 1992).

Etude de l'effet des pratiques sur le parasitisme

Nous évoquerons quelques exemples, sachant que d'autres cas d'étude sont détaillés dans ces actes, comme celui de la tavelure du pommier, *Venturia inaequalis*. Un premier exemple est en prise directe avec la conception de règles de choix culturaux telle qu'elle vient d'être illustrée. Il s'agit d'une étude expérimentale de l'effet de la combinaison « conduite de l'arbre – irrigation » sur la qualité des pêches et leur sensibilité aux monilioses (*Monilinia* spp. ; Mercier *et al.*, 2007). Quatre traitements ont été appliqués à des pêchers (nectarine jaune tardive, cv. Nectaross) par combinaison de facteurs taille et irrigation avec chacun 2 modalités : taille classique (TC) ou en branche fruitière (BF), irrigation selon bilan hydrique (BH) ou selon micromorphométrie Pépista (PEP). Les résultats de trois années d'essai indiquent que les techniques culturales innovantes (PEP et BF) diminuent significativement, par rapport aux techniques culturales les plus utilisées (BH et TAIL), l'incidence des monilioses au verger (moins de 5% contre 12 à 14% à la récolte) et en conservation. Les auteurs font l'hypothèse que l'arrachage manuel agit *via* le microclimat sur l'induction et sur la germination des conidies de monilioses tandis que l'irrigation conduite par Pépista agirait en limitant les fissures sur l'épiderme des fruits, ces fissures étant des voies d'entrées des conidies (Gibert, 2007). Par ailleurs, les techniques innovantes ne pénalisent ni la croissance globale de la plante, ni le rendement, et sont même capables d'améliorer la teneur en sucres des fruits à la récolte (cas de la restriction hydrique induite par PEP pendant la phase de

grossissement du fruit). Mais, elles s'accompagnent d'un risque de perte de calibre, qui est dommageable selon les standards actuels du marché.

Un deuxième exemple concerne la réponse d'un système multi-parasite en vergers de pommiers à la conduite de l'arbre (Simon et al., 2006). La conduite centrifuge, qui consiste en une suppression sélective (extinction artificielle) d'organes végétatifs et fructifères au centre de la couronne et sur les branches fructifères, permet une meilleure pénétration de la lumière et module à long terme la production et la qualité des fruits (Lauri et Lespinasse, 1999). La conduite en branche fructifère du pêcher précédemment évoquée s'en est du reste inspirée. La modification du micro-climat au sein de la couronne et de la dynamique de pousse qui en résulte est susceptible d'affecter différentes formes de parasitisme. Une comparaison sur trois ans entre différents modes de conduite indique que la conduite centrifuge réduit significativement les attaques de l'acarien rouge, *Panonychus ulmi*, et du puceron cendré, *Dysaphis plantaginea*, via un effet mécanique de l'extinction sur les colonies et un espace accru entre les organes colonisables, et des contaminations primaires de la tavelure, *Venturia inaequalis*. Pour la tavelure toutefois, la poursuite des contaminations au cours de l'été peut ramener l'infestation sur les fruits récoltés à un niveau équivalent entre les modes de conduite. Par rapport à une conduite conventionnelle (Solaxe), les arbres en conduite centrifuge sont par contre plus infestés par le carpocapse, en lien semble-t-il avec un taux accru de pénétration des insectes au centre de la couronne.

Un troisième exemple a trait à l'influence de la taille d'hiver et de la fertilisation azotée des pêchers sur la dynamique des populations de *M. persicae* (Grechi et al., 2006). Deux années d'expérimentation montrent que les pratiques testées sont capables de réguler les populations de pucerons via une modification de l'état de la plante, en particulier la croissance végétative. Le niveau d'infestation des arbres et la croissance des pousses sont positivement corrélés à l'intensité de taille et, en deçà d'un certain seuil, à la fertilisation azotée. Dans le cas d'un excès d'azote, la croissance végétative tend vers un maximum et le développement des populations de pucerons diminue. Ces résultats suggèrent l'existence d'un niveau de fertilisation optimal pour les pucerons. Des analyses sont en cours pour évaluer i) l'influence de la fertilisation sur la qualité nutritionnelle du feuillage (teneur en azote et composition en acides aminés) ou sur la teneur en composés issus du métabolisme secondaire ii) l'influence de ces compositions du feuillage sur la dynamique de croissance des populations de pucerons.

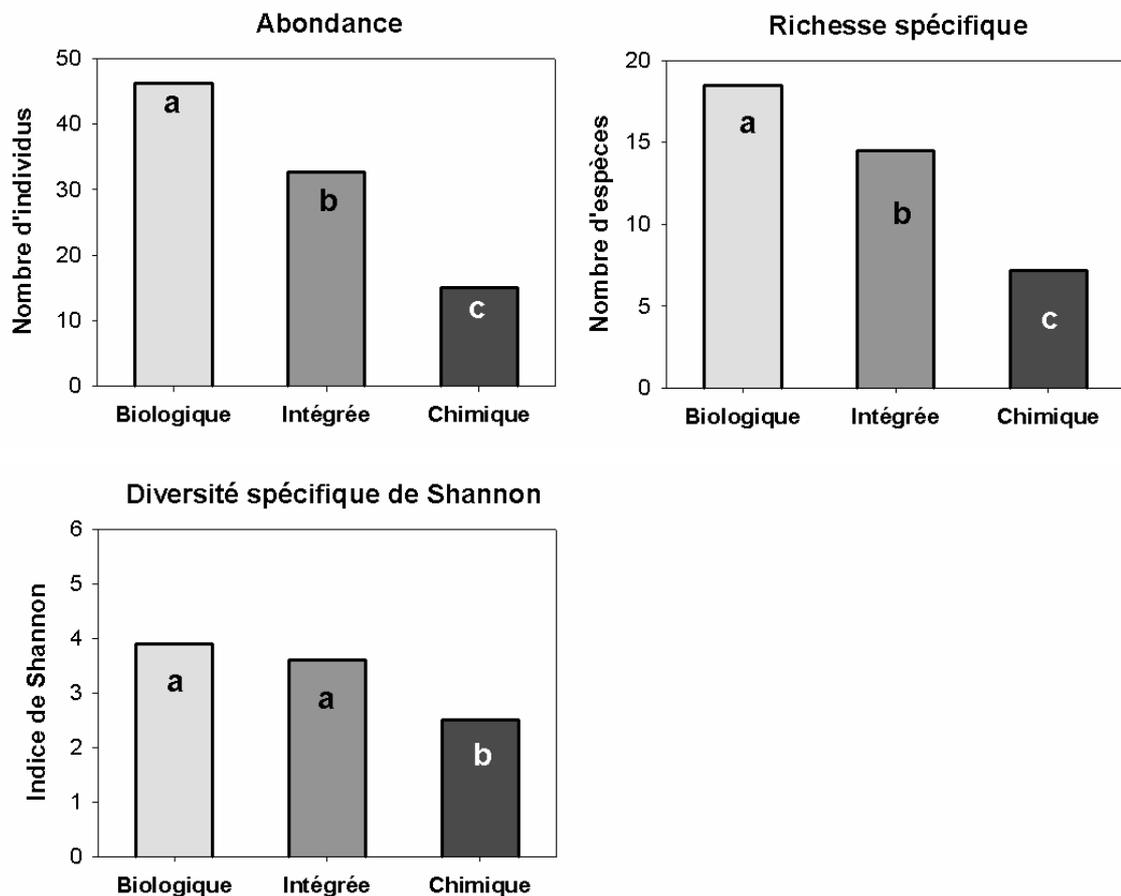
Evaluation des coûts des systèmes techniques et de leur impact sur la biodiversité

L'évaluation des coûts notamment en temps de travaux est très importante, les coûts de main d'œuvre représentant quasiment la moitié des charges en arboriculture fruitière (42% pour les exploitations fruitières spécialisées ou non en pêche et pomme ; source ONIFLHOR – CNCER – Ctifl, 2004). Les coûts et temps de travaux sont suivis dans l'expérimentation système menée à l'Unité de recherches intégrées Inra de Gotheron, qui vise à comparer plusieurs systèmes de protection en examinant la réponse du complexe parasitaire et du cortège d'auxiliaires (travaux en cours). De la même manière, les techniques innovantes et plus classiques de l'étude expérimentale citée plus haut sur l'effet de la combinaison « conduite de l'arbre – irrigation » sur la qualité des pêches et leur sensibilité aux monilioses, ont été comparées en termes d'intrants. Il en ressort que les techniques innovantes ne pénalisent pas les temps de travaux en matière de conduite des arbres (BF par rapport à TC, cf. supra), et permettent de limiter les quantités d'eau apportées à la parcelle à seulement environ 1/3 des quantités apportées pour les modalités classiques (PEP par rapport à BH).

L'impact des systèmes de protection sur la biodiversité a été évalué en utilisant des groupes biologiques occupant différents habitats et niveaux trophiques (avifaune, arthropodes) dans des vergers de pommiers et poiriers d'un domaine expérimental (domaine de Gotheron près de Valence) et d'un

réseau de parcelles commerciales de la région d'Avignon classées schématiquement en trois types de protection : agriculture biologique, protection conventionnelle, protection intégrée (utilisant la confusion sexuelle). Les pratiques phytosanitaires modifient significativement les communautés aviaires en termes d'abondance, de diversité spécifique (Figure 2) et de structure fonctionnelle, avec un fort déclin des taux relatifs d'insectivores et de rapaces en protection conventionnelle (à base de pesticides chimiques) par rapport aux autres systèmes de protection. La biomasse et les effectifs d'arthropodes de la canopée, ainsi que ceux de la strate herbacée et de la haie, sont les plus élevés en AB. La faune auxiliaire y est orientée vers les prédateurs généralistes. Les hyménoptères parasitoïdes prédominent dans les modalités incluant des insecticides chimiques, ce groupe semblant au contraire affecté par les traitements au soufre dans les vergers AB (Simon *et al.*, 2007a).

Figure 2 : Comparaison de l'abondance, de la richesse spécifique et de la diversité de Shannon (valeurs moyennes par parcelle) de l'avifaune de vergers de pommiers en protection biologique, intégrée (confusion sexuelle contre le carpocapse) et chimique. Les valeurs des colonnes portant les mêmes lettres ne diffèrent pas significativement (test PLSD de Fisher ou de Tukey au seuil de 0,05, lorsque les données sont distribuées normalement ou pas).



En plus de ces indices écologiques, l'utilisation de biomarqueurs comme la reproduction renseigne sur les impacts à l'égard de la biodiversité. Ainsi, Bouvier *et al.* (2005) ont montré que le mode de protection des vergers influait sur la reproduction des oiseaux insectivores. Cette dernière était suivie au moyen de nichoirs installés dans les parcelles commerciales de pommier précitées et classées en trois modalités de protection. Parmi les trois espèces susceptibles d'occuper les nichoirs dans la zone d'étude, seule la mésange charbonnière (*Parus major*) se reproduit avec succès dans l'ensemble des vergers des trois modalités, mais le nombre de jeunes à l'envol décroît significativement de 17 par ha

dans les vergers en AB à 11 en intégré et 9 en conventionnel. L'observation des paramètres de reproduction permet d'attribuer ces différences à la disponibilité en nourriture et à l'action neurotoxique des traitements altérant la capacité de nourrissage des adultes. La mésange bleue (*Parus caeruleus*) et le moineau friquet (*Passer montanus*) ne s'installent que dans les vergers en AB, avec des performances similaires à celles de biotopes naturels sans pesticides.

Modélisation des populations en interaction

Nous illustrerons ce thème en dépassant le strict aspect « construction de modèles » pour aller vers leur utilisation pour la conception de systèmes de protection intégrée. Nous avons expliqué plus haut que ce terme devait être entendu au sens large, et qu'il recouvrait aussi bien la modélisation de la phénologie ou de la dynamique des populations de bioagresseurs, que celle d'interactions entre des bioagresseurs et d'autres populations ou communautés. Un exemple du premier registre est donné dans ces actes : il s'agit d'un modèle de phénologie du carpocapse paramétré pour des insectes sensibles et résistants, et qui a permis de proposer une nouvelle stratégie de gestion des résistances visant à accroître la fréquence des individus sensibles en leur ménageant des périodes refuge.

Un autre exemple, qui appartient au second registre, est celui des interactions entre pêchers et monilioses. Nous avons déjà vu une manière de décliner cette interaction. Nous voulons ici en évoquer une autre explorée par Gibert (2007) à partir de plusieurs expérimentations, centrée sur le fruit – on pourrait parler d'interactions entre une population de fruits et une « population » de conidies de monilioses. Ce registre particulier d'interaction est fondé sur les fissures de l'épiderme des pêches, qui sont des voies d'entrée des conidies et des voies de sortie de l'eau par transpiration. Il s'est donc agi de modéliser la génération des fissures sur l'épiderme des fruits au cours de leur croissance, et plus généralement l'évolution de la conductance cuticulaire des fruits à laquelle elles participent, cette conductance étant impliquée dans les processus d'élaboration de la qualité *via* les pertes en eau qu'elle détermine (concentration des sucres dans la pulpe). Ce modèle de conductance, piloté par la croissance du fruit elle-même modulée par les opérations de gestion de la charge en fruits et d'irrigation, a une composante stomatique, une composante cuticulaire et une composante « fissures » fondée sur le différentiel de croissance entre la peau et la pulpe et sur des hypothèses simples sur le processus de cicatrisation (Gibert *et al.*, 2005 ; Gibert, 2007). De façon symétrique, la probabilité d'infection des fruits par les monilioses a été modélisée en fonction de la surface de microfissures sur le fruit et de la densité de conidies dans l'atmosphère, le produit des deux s'étant révélé un très bon candidat à l'explication de l'infection. Les modèles décrivant l'évolution de la conductance, la génération des fissures cuticulaires et la probabilité d'infection d'un fruit par les monilioses ont été intégrés à un modèle existant de pêche virtuelle capable de simuler la croissance et la qualité organoleptique, notamment l'accumulation des différents sucres dans le fruit. Le modèle final permet de simuler les performances de qualité et le potentiel de conservation des fruits en réponse à des conditions de croissance contrastées. Un total de 243 scénarios combinant des choix techniques relatifs à la variété, à la date d'éclaircissage, à la charge en fruits, à l'irrigation et au contrôle sanitaire des monilioses ont été testés et évalués à la vue de leurs performances simulées à la récolte tant au niveau économique (chiffre d'affaires), qu'au niveau du profil de qualité des fruits (caractère sucré, teneur en matière sèche de la pulpe, ratio de pulpe par fruit, et densité de fissures cuticulaires indicatrice d'altération potentielle du fruit en conservation), du risque de perte de récolte (probabilité d'infection) et de la possibilité ou non de réduire les traitements fongicides. Les scénarios les plus intéressants dans une optique de production intégrée comportent des stress hydriques en fin de croissance du fruit. Ils produisent des fruits plus petits que les scénarios classiques, mais avec une faible densité de fissures cuticulaires, un fort caractère sucré, une forte teneur en matière sèche dans la pulpe et un ratio de pulpe par fruit élevé. Comme précédemment, ce type de résultat interroge sur la compatibilité entre la nécessité d'une protection/production intégrée et les standards actuels du marché.

Quel futur pour la conception de systèmes de protection en arboriculture ?

Plusieurs voies de recherche nous semblent particulièrement importantes à explorer pour la conception de systèmes de protection en arboriculture. *Une première voie est la manipulation de l'architecture des arbres.* Les arbres fruitiers sont des plantes fortement architecturées, et leur architecture est capable de modifier l'attractivité de la plante-hôte, les conditions de vie des bioagresseurs et de leurs ennemis *via* le microclimat, la disponibilité et l'accessibilité des ressources, ainsi que l'efficacité des méthodes de contrôle (Simon *et al.*, 2007b). Des études précises sont nécessaires pour élucider les liens entre pratiques (taille notamment) et architecture d'une part, entre architecture et développement des bioagresseurs d'autre part.

Une deuxième voie est la compréhension et la modélisation des interactions trophiques au sein de réseaux associant une culture, des bioagresseurs et des ennemis, notamment des ennemis naturels, et du *pilotage de ces interactions par les actes techniques.* Cette voie suppose une rencontre entre écologie et agronomie et n'a été que peu explorée malgré quelques exceptions notables (Gutierrez et coll., Univ. Berkeley, sur coton et manioc essentiellement : Gutierrez, 1996). Des travaux en cours sur les interactions entre fonctionnement des pêchers et développement des pucerons verts sous l'influence de la taille des arbres, de la fertilisation azotée, de l'application de pesticides et du lâcher de coccinelles prédatrices (Grechi et al, 2006) montrent que cette voie est prometteuse mais aussi qu'elle indique de nombreux trous de connaissance. En dehors de ce cas d'application, l'exploration de cette voie se heurte à deux difficultés particulières. La première est la difficulté à composer avec un complexe (ou un cortège) de bioagresseurs. Il est urgent de s'attaquer à cette difficulté, sans sous-estimer l'investissement nécessaire, à l'instar de ce que fait Savary en proposant des concepts (guildes épidémiologiques, guildes d'agents pathogènes) et des méthodes d'observation et de traitement de données pour étudier les liens entre situations de production et associations de bioagresseurs (Savary *et al.*, 2006a, b). La deuxième difficulté concerne la régulation par les ennemis naturels. Si la lutte biologique a fait l'objet de nombreux travaux théoriques et appliqués (et continue d'en faire l'objet), ce n'est pas le cas de la régulation par les ennemis naturels, qui est pourtant un processus implicite à piloter par l'aménagement écologique des zones de production à l'ordre du jour. Il faut expliciter ce processus pour diriger dans le bon sens de telles mesures de gestion.

Une troisième voie est la prise en compte de l'échelle « paysage ». Cette échelle est *a priori* pertinente sachant l'importance reconnue, sur des bioagresseurs et auxiliaires souvent très mobiles, de l'effet de la composition en habitats (au sens large) de l'espace dans lequel ils évoluent. Mais, là encore, comment composer avec le paysage ? Le paysage peut être défini par sa « complexité », une notion qui tient à la proportion de zones non cultivées, à la petitesse des parcelles, à leur morcellement (*patchiness*). Mais l'effet attendu de cette complexité sur la régulation des bioagresseurs (*via* les rôles d'abris et de ressources alimentaires pour les auxiliaires) n'est pas systématiquement vérifié (Bianchi *et al.*, 2006). Ceci renvoie à la nécessité d'explicitation précédemment évoquée. Le paysage peut être vu comme un mosaïque de cultures et de zones non cultivées. Avec cette vision, la modélisation peut être mise à profit pour optimiser la distribution spatiale de zones refuges pour la lutte contre des ravageurs (Vacher *et al.*, 2003). Enfin, le paysage peut être vu comme une mosaïque de pratiques. Une étude exploratoire dans un bassin de production de pommes montre que les effectifs et dégâts du carpocapse dans des parcelles de pommier dépendent non seulement de caractéristiques « strictement » paysagères comme la densité en vergers dans l'environnement de ces parcelles, mais aussi de pratiques locales (Ricci, 2006). Ces trois angles de vision sont probablement nécessaires pour élaborer des modèles de population associant les facteurs de sélection et de migration et utilisables pour la conception de scénarios de protection « paysagers ».

On peut attendre de telles approches qu'elles améliorent l'efficacité de méthodes sélectives de lutte directe, auxquelles est aujourd'hui très souvent préférée une lutte chimique exclusive. Le développement de ces méthodes, non évoqué ici, se poursuit notamment pour des bioagresseurs à

faible seuil de tolérance et dont on ne perçoit pas pour l'instant de possibilité de maîtrise complète via la conduite de l'arbre ou l'aménagement de l'environnement. Citons comme exemple la sélection de nouvelles souches de virus de la granulose pour contrer la résistance du carpocapse des pommes à cet insecticide microbiologique, ou encore le développement par les techniciens du sud-est de filets para-grêle mono-rangs modifiés pour les rendre étanches aux attaques de carpocapse.

Compte tenu du caractère complexe de la conception de systèmes de protection en arboriculture, illustré dans cette contribution par des exemples de travaux en cours et par les pistes importantes à explorer, la conception assistée par modèles telle que nous l'avons décrite paraît une voie importante à développer. Les contraintes, conceptions et problèmes de coordination des acteurs en charge de la gestion concrète du risque sanitaire en arboriculture forment un autre champ non évoqué ici. Leur prise en compte appelle la coopération entre sciences biotechniques et sociales.

Références bibliographiques

- Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (eds), 2005. Chapitre 4 : stratégies de protection des cultures. In *Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Rapport d'expertise scientifique collective Inra-Cemagref « Pesticides, agriculture et environnement » à la demande du MAP et du MEDD.*
- Bianchi F.J.J.A., Booij C.J.H., Tschardtke T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc. R. Soc. B* 273 : 1715–1727.
- Bouvier J.C., Toubon J.F., Boivin T., Sauphanor B., 2005. Effects of apple orchard management strategies on the great tit (*Parus major*) in southeastern France. *Environmental Toxicology and Chemistry* 24 : 2846-2852.
- Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J., 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Editions Quae, Versailles, 367 pp.
- Gibert C., 2007. Génération de fissures cuticulaires sur la pêche (*Prunus persica* (L.) Batsch) en réponse à des opérations culturales. Conséquences pour la qualité et la contamination par les monilioses. Thèse de doctorat, Univ. Avignon, 154 pp.
- Gibert C., Lescourret F., Génard M., Vercambre G., Pastor A.P., 2005. Modelling the effect of fruit growth on surface conductance to water vapour diffusion. *Annals of Botany* 95 : 673-683.
- Grechi I., Sauphanor B., Hilgert N., Senoussi R., Sauge M.H., Chapelet A., Lacroze J.P., Lescourret F., 2006. Effect of winter pruning on the peach-*Myzus persicae* interactions. In *OILB, Organisation Internationale de Lutte Biologique, Section Régionale Ouest Paléarctique, Groupe de travail Protection intégrée en vergers, Workshop on Integrated plant protection in stone-fruit orchards.*
- Gutierrez A.P., 1996. *Applied population ecology. A supply-demand approach*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Huguet J.G., Li S.H., Lorendeau J.Y., Pelloux G., 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit-trees to water-stress irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science* 67: 631-640.
- Lauri P.E., Lespinasse J.M., 1999. Apple tree training in France: current concepts and practical implications. *Fruits* 54: 441-449.
- Mercier V., Bussi C., Plénet D., Lescourret F., 2007. Effects of limiting irrigation and of manual pruning on brown rot incidence. *Crop Protection* in press.
- Meynard J.M., Reau R., Robert D., Saulas P., 1996. Evaluation expérimentale des itinéraires techniques. In *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une*

agriculture en mutation. Acta, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DERF), Paris, 63-72.

Paratte R., 2004. *Autour du pommier: trajectoire d'un collectif de travail et construction de connaissances*. Mémoire de Licence d'ethnologie, Université de Neuchâtel, Faculté des lettres et sciences humaines, 150 pp.

Penvern S., Bellon S., Fauriel J., Sauphanor B., 2007. Characterisation and evaluation of protection strategies towards aphids in peach orchards. In *Séminaire à mi-parcours EcoGER, 22-23 oct 2007* (Poster).

Picard C., 2007. *Pratiques de protection contre le carpocapse des pommes : stratégies, temporalité et impacts environnementaux*. Mémoire pour le diplôme d'ingénieur agronome, Montpellier-SupAgro/Agrocampus Rennes/AgroParisTech, 25 pp. + annexes.

Plénet D., Navarro E., De Bruyne F., Guinet P., Blanc P., 2006. Pêches et nectarines. Optiverger : combinaison d'une nouvelle conduite des arbres et d'une irrigation raisonnée. *L'Arboriculture Fruitière* 601: 31-35.

Reau R., Meynard JM., Robert D., Gitton C., 1996. Des essais factoriels aux essais « conduite de culture ». In *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Acta, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DERF), Paris, 52-62.

Ricci B., 2006. Influence de l'organisation spatiale du parcellaire, des pratiques agricoles et des éléments du paysage sur les densités du carpocapse, un bioagresseur du pommier. Mémoire de Master 2, Université de Marne la Vallée, Marne la Vallée, 70 pp.

Savary S., Mille B., Rolland B., Lucas P., 2006a. Patterns and management of crop multiple pathosystems. *European Journal of Plant Pathology* 115: 123-138.

Savary S., Teng P.S., Willocquet L., Nutter F.W. Jr., 2006b. Quantification and modeling of crop losses: a review of purposes. *Annual Review of Phytopathology* 44: 89-112.

Simon S., Lauri P.E., Brun L., Defrance H., Sauphanor B., 2006. Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchard. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 81: 765-773.

Simon S., Defrance H., Sauphanor B., 2007a. Effect of codling moth management on orchard arthropods. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122: 340-348.

Simon S., Sauphanor B., Lauri P.E., 2007b. Control of fruit tree pests through manipulation of tree architecture. *Pest Technology* 1: 33-37.

Toubon J.F., 1999. Les freins à l'adoption des méthodes de protection intégrée dans les vergers de la région d'Avignon. In *ANPP-5^{ème} Conférence Internationale sur les ravageurs en agriculture*, 319-327.

Vacher C., Bourguet D., Rousset F., Chevillon C., Hochberg M.E., 2003. Modelling the spatial configuration of refuges for a sustainable control of pests: a case study of Bt cotton. *Journal of Evolutionary Biology* 16 : 378-387.

N.B. : A consulter également : Phytoma-LDV n° 581, avril 2005.