

Chapitre 4

Stratégies de protection des cultures

Coordinateurs du chapitre : Jean-Noël Aubertot et Serge Savary

Auteurs : Jean-Noël Aubertot (INRA), Michel Clerjeau (ENITAB/INRA), Christophe David (ISARA), Philippe Debaeke (INRA), Marie-Hélène Jeuffroy (INRA), Philippe Lucas (INRA), Françoise Monfort (INRA), Philippe Nicot (INRA), Benoît Sauphanor (INRA)

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 4.1. Concepts pour la protection des cultures | 4 |
| 4.1.1. La protection des cultures : pourquoi ? | 4 |
| 4.1.2. Bio-agresseurs des cultures et performances des agrosystèmes | 5 |
| 4.1.3. Typologie des cycles biologiques des bio-agresseurs | 7 |
| 4.1.4. Quantification de la nuisibilité des bio-agresseurs | 11 |
| 4.1.6. Quantification des dégâts..... | 12 |
| 4.1.7. Quantification du dommage | 13 |
| 4.1.8. Déterminants des pertes de récolte | 14 |
| 4.1.9. Définitions du risque en protection des cultures..... | 15 |
| 4.1.10. Décisions et stratégies de gestion..... | 16 |
| 4.2. Méthodes de protection des cultures | 17 |
| 4.2.1. Panorama des différentes méthodes de contrôle..... | 17 |
| 4.2.2. Raisonement de la lutte chimique | 19 |
| 4.2.2.1. Réduction de la fréquence de traitement | 19 |
| 4.2.2.2. Réduction des doses d'application par unité de surface cultivée..... | 19 |
| 4.2.2.3. Choix des périodes et des conditions d'application des pesticides..... | 19 |
| 4.2.3. Les résistances obtenues par la sélection variétale | 20 |
| 4.2.4. Lutte biologique..... | 20 |
| 4.2.5. Les méthodes de lutte physique..... | 21 |
| 4.2.5.1. La lutte thermique | 21 |
| 4.2.5.2. La lutte électromagnétique | 21 |
| 4.2.5.3. La lutte mécanique | 21 |
| 4.2.5.4. La lutte pneumatique | 22 |
| 4.2.6. Les méthodes associées au système de culture : le contrôle cultural | 22 |
| 4.2.7. Les biotechnologies et le génie génétique | 24 |
| 4.2.7.1. Remarques générales | 24 |
| 4.2.7.2. Biotechnologies et protection des plantes | 27 |
| 4.2.7.3. Position de la Société Américaine de Phytopathologie vis-à-vis des biotechnologies | 28 |
| 4.2.7.4. La mise en culture de plantes génétiquement modifiées permet-elle une réduction de l'utilisation des pesticides ? | 28 |
| 4.2.8. Induction de résistance chez les plantes..... | 31 |
| 4.2.9. L'intégration en protection des cultures..... | 32 |
| 4.2.9.1. IPM - Quelques définitions..... | 32 |
| 4.2.9.2. Questions relatives à l'intégration en protection des cultures | 33 |
| 4.3. Les grandes cultures | 36 |
| 4.3.1. Les bio-agresseurs des grandes cultures | 36 |
| 4.3.2. Les pratiques actuelles | 45 |
| 4.3.2.1. Panorama général | 45 |
| 4.3.2.2. Cas de l'agriculture biologique..... | 49 |
| 4.3.2.3. Durabilité de l'efficacité des méthodes de lutte..... | 52 |
| 4.3.3. Les alternatives aux pratiques actuelles en grandes cultures | 54 |
| 4.3.3.1. Raisonement de la lutte chimique..... | 54 |
| 4.3.3.2. Apports de l'amélioration génétique..... | 55 |
| 4.3.3.3. Les méthodes de lutte biologique | 57 |
| 4.3.3.4. Lutte physique | 58 |
| 4.3.3.5. Les méthodes de contrôle cultural | 59 |
| 4.3.4. Bilan intermédiaire pour les grandes cultures | 62 |
| 4.4. Les productions légumières | 63 |
| 4.4.1. Les bio-agresseurs des productions légumières | 63 |
| 4.4.1.1. Notion de pertes sur cultures légumières | 65 |
| 4.4.1.2. Spécificités des productions légumières en matière de gestion des problèmes parasitaires..... | 65 |
| 4.4.2. Les pratiques actuelles | 66 |
| 4.4.2.1. Les pratiques de désinfection des sols par fumigation | 66 |
| 4.4.2.2. Cultures mineures et restriction d'emploi des produits phytosanitaires | 66 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4.3. Les alternatives | 67 |
| 4.4.3.1. Les alternatives en matière de gestion des bio-agresseurs telluriques | 67 |
| 4.4.3.2. Les alternatives en matière de gestion des ravageurs aériens en plein champ..... | 69 |
| 4.4.3.3. Les alternatives en matière de gestion des ravageurs aériens en sol sous abri..... | 70 |
| 4.5. La vigne | 74 |
| 4.5.1. Les bio-agresseurs de la vigne | 74 |
| 4.5.1.1. Agents de pertes de récoltes (groupe 1)..... | 74 |
| 4.5.1.2. Agents responsables de baisses de qualité (groupe 2) | 75 |
| 4.5.1.3. Agents responsables de dépérissements ou de dégénérescence (groupe 3) | 75 |
| 4.5.2. Les pratiques actuelles | 77 |
| 4.5.2.1. Cadre général | 77 |
| 4.5.2.2. Lutte contre les maladies..... | 78 |
| 4.5.2.3. Lutte contre les insectes et acariens | 79 |
| 4.5.2.4. Protection intégrée | 81 |
| 4.5.3. Les alternatives | 81 |
| 4.5.3.1. Procédés innovants | 81 |
| 4.5.3.2. Pratiques culturales préventives..... | 83 |
| 4.5.3.2. Perspectives de l'IPM en viticulture | 84 |
| 4.5.4. Bilan intermédiaire pour la vigne | 88 |
| 4.6. L'arboriculture fruitière | 89 |
| 4.6.1. Principaux bio-agresseurs en arboriculture fruitière | 89 |
| 4.6.2. Pratiques actuelles..... | 90 |
| 4.6.3. Alternatives | 92 |
| 4.6.3.1. La lutte génétique | 92 |
| 4.6.3.2. La lutte biologique | 92 |
| 4.6.3.3. La lutte microbiologique..... | 93 |
| 4.6.3.4. La lutte autocide | 93 |
| 4.6.3.5. La lutte biotechnique | 94 |
| 4.6.3.6. Méthodes mécaniques..... | 94 |
| 4.6.4. Exemple du verger de pommiers | 95 |
| 4.6.5. Bilan intermédiaire pour l'arboriculture fruitière..... | 97 |
| 4.6.5.1. Situation en Europe | 97 |
| 4.6.5.2. Etat actuel en France..... | 98 |
| 4.7. Bilans et perspectives pour la recherche en protection des cultures | 99 |
| 4.7.1. Quelques éléments clés..... | 99 |
| 4.7.2. Conclusions du Chapitre 4 | 102 |
| 4.7.3. Perspectives pour la recherche..... | 103 |

[Références bibliographiques](#)

4.1. Concepts pour la protection des cultures

4.1.1. La protection des cultures : pourquoi ?

Protéger une culture n'a pas pour objectif proximal de réduire la quantité d'ennemis des cultures qui l'attaquent. Elle n'a pas pour but immédiat non plus de réduire la vitesse d'une épidémie causée par un pathogène donné, ou de réduire, cycle après cycle, la taille de population d'un groupe de bio-agresseurs, ni encore d'annihiler l'ensemble des bio-agresseurs qui affectent une culture, ou d'empêcher à jamais la survenue d'autres.

Certains de ces objectifs sont en réalité les étapes d'un but ultime. Certains autres sont inaccessibles ou non désirables. L'objectif ultime de la protection des cultures est de réduire les pertes de récoltes occasionnées par les bio-agresseurs.

Ce point établi, deux questions fondamentales se posent :

- comment qualifier une perte de récolte - s'agit-il uniquement de pertes en biomasse récoltée ?
- jusqu'à quel niveau cette perte (ces pertes, si celles-ci sont de dimensions différentes) est-elle tolérable ?

Les éléments qui suivent dans cette section sont destinés à expliciter, d'une part, ce que l'on peut considérer comme une perte de récolte, ce que l'on peut mesurer - et ce que l'on ne mesure pas bien encore -, et d'autre part, à expliciter le contexte dans lequel ce qui est tolérable est déterminé.

| Pertes directes | Pertes indirectes | |
|---|---------------------------------------|-------------------------|
| | Pertes primaires | Pertes secondaires |
| - quantité | contamination des semences | exploitation |
| - qualité | infestation du sol | communauté |
| - coût de gestion | affaiblissement des cultures pérennes | exportateurs |
| - coûts supplémentaires de récolte | coûts de gestion | commerce (gros, détail) |
| - coûts supplémentaires de tri | | consommateurs |
| - coût de re-semis / replantation | | gouvernements |
| - coût lié au remplacement par une culture moins rentable | | environnement |

Tableau 4.1-1. Typologie des pertes de récoltes occasionnées par les bio-agresseurs de peuplements cultivés.

Zadoks et Schein (1979) donnent un synopsis de la nature des pertes de récoltes avec le tableau 4.1-1. Ce tableau reprend les normes établies et adoptées par l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation.

Ce tableau indique deux premières catégories de pertes de récoltes : celles causées directement par un bio-agresseur, et celles dont il est indirectement responsable. Parmi ces dernières, on peut distinguer des pertes indirectes primaires (liées à l'activité biologique du bio-agresseur), et des pertes indirectes secondaires (liées aux conséquences de cette activité biologique).

Un parasite tellurique (*Rhizoctonia solani*, par exemple) peut provoquer des pertes de récoltes directes sur pomme de terre (en quantité) ; d'autres pertes directes (souvent aussi importantes) sont une dépréciation de qualité (taches sur les tubercules), des coûts de gestion de la maladie, des coûts supplémentaires de tri. Des pertes indirectes concernent les contaminations de semences et du sol. Des pertes indirectes secondaires à l'échelle de l'exploitation, de la communauté agricole (coopérative par exemple), des systèmes d'exportation et commerciaux peuvent s'ensuivre. Le rôle de la situation de production est essentiel dans ce cas (effets de la mécanisation, disparition du tri manuel, marché de la pomme de terre lavée).

La gestion des mauvaises herbes prend évidemment en compte les pertes de récoltes directes en quantité. Mais une mauvaise gestion des adventices peut également causer des coûts supplémentaires de gestion du peuplement et des coûts de récolte additionnels ; par-dessus tout, une mauvaise gestion des adventices a des répercussions graves sur les cycles culturaux suivants (banques de semences du sol) et les options de rotation possibles. Le cas de beaucoup de nématodes (par exemple, le nématode doré de la pomme de terre) est analogue.

Le terme "perte de récolte", que nous demandons au lecteur de ne pas confondre avec "perte de rendement" en lisant ce texte, recouvre un ensemble de facettes diverses, certaines difficiles à évaluer, d'autres, hors du champ conventionnel de la protection des plantes. Le coût lié au remplacement par une culture moins rentable (c'est-à-dire, un coût d'opportunité), par exemple, est une cause de perte économique très importante pour les agriculteurs et le tissu agricole ; l'évaluation de ce type de perte économique est souvent difficile à effectuer.

Ce tableau distingue donc les pertes de récoltes directes - directement imputables à l'activité des bio-agresseurs des pertes indirectes - résultant des dommages¹, des pertes² économiques, et des cycles biologiques (propagules résistantes, structures de survie) des bio-agresseurs. La classification élaborée par Zadoks et Schein incorpore également les notions de pertes de récoltes primaires et secondaires. Le terme 'perte de récolte' auquel ce chapitre fait référence à de très nombreuses reprises, ne renvoie donc pas à la notion limitée de 'perte de rendement', même si celle-ci en fait partie ; et c'est bien à la notion d'ensemble, recouverte par le terme 'perte de récolte' illustrée par le tableau ci-dessus que nous voulons faire référence ici.

Ce point très important étant posé, il est également clair que la littérature scientifique, pour tout un ensemble de raisons, s'est beaucoup plus attachée à quantifier, analyser, modéliser, comprendre, et prédire les pertes de rendement, c'est-à-dire, les pertes de récoltes directes quantitatives (pour reprendre la classification de Zadoks et Schein et de la FAO). L'une des raisons immédiates à cet état des connaissances et des méthodes est que la communauté scientifique s'est, depuis des décennies, attachée à la résolution du problème de sécurité alimentaire globale. Une autre raison, que nous développons, est qu'il ne peut y avoir de perte économique que si au préalable les mécanismes sous-jacents à une perte de rendement ne se sont pas exprimés. Au plan méthodologique, c'est donc sur l'aspect des pertes directes quantitatives ('pertes de rendement') que nous reconnaissons comme restreint, que plusieurs points sont développés ci-dessous.

4.1.2. Bio-agresseurs des cultures et performances des agrosystèmes

Les bio-agresseurs des cultures sont des composants des agrosystèmes, au même titre que les sols, les plantes qui y sont cultivées, les instruments qui y sont utilisés, ou les producteurs eux-mêmes (Rabbinge, 1989). Comme les autres composants des agrosystèmes, les bio-agresseurs sont influencés par des facteurs extérieurs, physiques comme le climat, économiques comme l'évolution des marchés agricoles, ou sociaux comme les savoir-faire ou les traditions agricoles. Et comme les autres composants des agrosystèmes, les bio-agresseurs des cultures influent sur les performances, positives ou négatives, des agrosystèmes.

Une vision sur le fonctionnement et les performances des agrosystèmes où les bio-agresseurs sont inclus présente deux intérêts, tous les deux d'importance équivalente. Le premier intérêt est scientifique : cette vision élargie permet d'appréhender l'ensemble des mécanismes qui influent d'une part sur la biologie des bio-agresseurs, et d'autre part sur les effets qu'ils peuvent avoir sur les agrosystèmes et leurs performances. Le second intérêt est concret et pratique : cette vision permet d'aborder la gestion des bio-agresseurs dans le contexte de celui des agrosystèmes, et non pas isolément.

L'histoire de la protection des cultures est riche d'erreurs qui démontrent les risques d'interventions simplistes, où les contextes de production sont ignorés. Par ailleurs, la protection des cultures n'est, pour l'essentiel, pas le fait de spécialistes, mais de producteurs pour qui elle n'est nécessairement

¹ Terme défini plus loin dans le texte.

² Terme défini plus loin dans le texte.

qu'une facette parmi d'autres préoccupations. *A contrario*, ignorer les connaissances accumulées sur la biologie et les effets des bio-agresseurs sur les cultures représenterait une régression grave.

Dans une perspective de recherche agronomique, il serait donc maladroit de confiner la réflexion à, par exemple, la dynamique des populations, leur "écologie", et leur génétique. Certainement, ces éléments sont nécessaires à une compréhension du fonctionnement des systèmes ; mais ils ne sont pas suffisants pour gérer des agrosystèmes de manière durable, notamment quant à leurs bio-agresseurs. Un élément utile est le concept de *situation de production*, qui recouvre l'ensemble des facteurs physiques, biologiques, techniques, sociaux et économiques qui concourent à la production végétale (de Wit, 1978, 1982). Ce concept peut paraître trop général et trop vague pour être opérant en agronomie ; des éléments sont avancés ci-dessous pour montrer qu'en réalité ce n'est pas exact. Il peut également paraître très éloigné des préoccupations immédiates de la protection des cultures ; c'est en réalité le contraire : une situation de production définit un rendement accessible, et de ce fait permet de quantifier les pertes de récoltes occasionnées par les adventices, les pathogènes ou les ravageurs animaux des cultures. La mise en œuvre du concept requiert évidemment qu'une définition opérationnelle lui soit donnée, afin de permettre une mesure. Ce point est également abordé ci-dessous.

Plutôt que le triangle : Bio-agresseur - Plante - Homme, c'est donc le tétraèdre : Peuplement végétal - Bio-agresseurs - Environnement - Homme qui est le cadre de la réflexion actuelle en protection des cultures (Zadoks et Schein, 1979). Cette structure rend compte des relations réciproques entre bio-agresseurs, plantes, environnement, et activités humaines. Par ailleurs, il fournit le contexte de la protection des cultures par des interventions, directes (destinées spécifiquement au contrôle des bio-agresseurs), ou indirectes (via le peuplement végétal - par exemple, le déploiement d'une résistance ; ou via l'environnement physique - par exemple, l'utilisation de méthodes d'irrigation différentes). La notion de pathosystème (Robinson, 1976) (pris ici au sens large, et incluant l'ensemble des bio-agresseurs possibles et les peuplements végétaux avec lesquels ils interagissent), en interaction et incluse dans un agrosystème est le fondement d'une logique pour comprendre et gérer, qui est abordée plus loin.

L'activité agricole se traduit par des résultats, des performances, dont certaines sont désirées (une production de grains, par exemple), et d'autres, indésirables (l'émission d'effluents, par exemple). On peut résumer rapidement les principaux éléments en jeu ainsi (Van Ittersum et Rabbinge, 1997) :

- L'activité agricole requiert des intrants, de deux types : substituables (travail, machinerie, pesticides, par exemple), ou non substituables parce que jouant un rôle essentiel dans le fonctionnement des agrosystèmes (eau, semences, nutriments, par exemple). Elle permet par ailleurs des performances, soit primaires, correspondant à la production agricole ou partie d'entre elle, soit secondaire (et généralement indésirable), comme les effluents de nutriments vers l'environnement, ou la diffusion de pesticides.
- Trois niveaux de production peuvent être définis selon la prise en compte de trois groupes distincts de facteurs (de Wit et Goudriaan, 1978 ; Rabbinge *et al.*, 1989) : (1) ceux qui déterminent la croissance, (2) ceux qui la limitent, et (3) ceux qui la réduisent. La production potentielle est le reflet du premier groupe exclusivement ; la production accessible est celle des deux premiers ; et la production réelle effective, le reflet des trois groupes de facteurs considérés ensemble. Ainsi, la production d'un champ de blé est (notamment) déterminée par le rayonnement et le génotype de la variété choisie (facteurs déterminants), limitée par la disponibilité en eau et en azote à certains stades de développement du peuplement (facteurs limitants), et réduite par l'activité biologique de certains bio-agresseurs (facteurs de réduction). Les facteurs de réduction incluent les bio-agresseurs des cultures, mais aussi les accidents climatiques.
- *Un point important est que les mesures destinées à accroître la production effective sont liées à des facteurs non substituables (l'eau et les nutriments, notamment), tandis que les intrants destinés à la protection de cette production sont souvent substituables, au moins jusqu'à un certain degré.*

Ces définitions peuvent paraître statiques, qui segmentent la production en trois niveaux (apparemment) indépendants (potentiel, accessible et effectif), et qui cloisonnent artificiellement les facteurs et les processus de la production. En réalité, elles permettent au contraire une analyse poussée des interactions ; ce point est essentiel, et il est discuté plus en détail ci-dessous.

A ce point de cette discussion, néanmoins, ces définitions permettent :

- de définir objectivement les bio-agresseurs comme étant des facteurs biologiques de réduction du rendement accessible ;
- de définir une perte quantitative de récolte occasionnée par les bio-agresseurs des plantes comme l'écart entre rendements accessible et effectif ; c'est la définition utilisée par la FAO depuis 1971 (Chiarappa, 1971, 1980 ; Zadoks et Schein, 1979) ;
- d'utiliser les pertes de récoltes comme *une mesure de l'efficacité actuelle des méthodes de gestion mises en œuvre* contre les bio-agresseurs, *ainsi que des progrès que l'on peut escompter d'avancées futures* dans le domaine de la protection des plantes (Zadoks, 1981a).

Comme l'indiquent les éléments ci-dessus, cette discussion se focalise sur une catégorie de pertes de récoltes seulement, les pertes quantitatives directes, c'est-à-dire les réductions de production en quantité directement attribuables aux bio-agresseurs. Les pertes de récoltes indirectes (par exemple, le coût de remise en place d'un nouveau peuplement végétal, ou le coût d'opportunité qui amène à ne pas mettre en place une culture et en choisir une autre, moins rentable, à cause des bio-agresseurs de la première), ou les pertes de récolte directes de type qualitatif (par exemple, la contamination du produit récolté par des toxines), ne sont pas prises en compte ici. Ces pertes sont, évidemment, très importantes, et mériteraient un traitement spécial. L'élément essentiel, cependant, est d'aborder les méthodes concernant les pertes de récoltes, en tant que raison d'être de la protection des cultures. On évoque donc ici les concepts et méthodologie existant pour quantifier, analyser, et modéliser les pertes de récoltes, en se restreignant au type le mieux documenté, celui des pertes de récoltes quantitatives directes.

Le cas des pertes de récolte de type qualitatif, qui sont d'une importance vitale pour certaines productions végétales, est cependant repris plus loin.

Deux points de vue existent, et sont également utiles, pour désigner une "épidémie", terme ici pris au sens général, censé s'appliquer à des ravageurs animaux, des adventices, ou des pathogènes de plantes. Ces deux paradigmes s'expriment ainsi :

- *Une épidémie dans un peuplement végétal est la conséquence d'une perturbation de son environnement.* Cette vision est particulièrement fréquente parmi les spécialistes de la santé des forêts. Bien souvent, le développement de bio-agresseurs attaquant les peuplements forestiers a pour origine une perturbation physique (climatique par exemple) ou humaine (gestion brutale des peuplements). On pourrait y rattacher les effets de pollutions. Cette notion est parfaitement applicable à la protection des plantes cultivées : la monoculture sur de très grands espaces d'un génotype (groupe de génotypes) sensibles est en soi une perturbation, et l'on connaît bien ses conséquences possibles.
- *Une épidémie est un phénomène (un processus) récurrent, influencé par le milieu, susceptible dans certains cas de provoquer des pertes de récoltes.* S'en suivent des pertes de récoltes chroniques, qui progressivement affectent le fonctionnement d'un agrosystème, en l'affaiblissant. Si ces épidémies présentent des phases paroxystiques, des pertes considérables de récoltes peuvent en découler.

Clairement, la gestion des deux types d'épidémies, générale, récurrente et chronique, ou bien ponctuelle et violente dans le temps et l'espace, fait appel à des mesures de contrôle différentes (voir ci-dessous). Bien entendu, des combinaisons des deux types existent, et constituent en fait la majorité des cas.

4.1.3. Typologie des cycles biologiques des bio-agresseurs

La protection des plantes est fondée sur une connaissance de : (1) leurs dynamique (et des déterminants de cette dynamique), et (2) des conséquences que ces dynamiques peuvent avoir sur le peuplement cultivé (les modes de trophismes, et les interactions entre modes de trophisme et physiologies des plantes et du couvert). Dans une très large mesure, c'est sur le premier de ces points que le raisonnement de protection des cultures est aujourd'hui fondé. Ce faisant, le raisonnement ignore d'autres manières de gérer, sur le long terme, et d'atténuer, sur le court terme, les bio-agresseurs des cultures en tant que facteurs de réduction des performances des agrosystèmes.

L'un des éléments importants que ce chapitre veut souligner est que le second point, le fonctionnement et les performances du peuplement végétal, en interaction avec les populations de bio-agresseurs (et leur résultante, des dégâts) constitue une base essentielle pour l'élaboration de stratégies de gestion durables. Il nous apparaît néanmoins nécessaire de reprendre le premier point, les cycles biologiques des bio-agresseurs, ici afin d'être complets dans notre analyse : ils constituent souvent le fondement de la protection des cultures en France. Autant, donc, serait-il faux de penser que les cycles biologiques des bio-agresseurs constituent l'unique fondement d'un raisonnement en protection des cultures, autant il est apparent que ces cycles doivent être abordés ici.

La diversité des cycles biologiques des bio-agresseurs est telle que tout essai de typologie est voué à des simplifications susceptibles d'être abusives. L'exercice est d'autant plus dangereux s'il est associé à des typologies d'action, car alors d'importantes erreurs issues de généralisations excessives sont possibles. Nous nous livrons néanmoins à cette extrapolation supplémentaire. Mais nous insistons sur le caractère réducteur, schématique, de ce qui suit, et recommandons au lecteur de n'y voir qu'un canevas de réflexion, et un canevas incomplet, puisque manquent à ce schéma les éléments concernant les dommages et les pertes que les bio-agresseurs sont susceptibles d'occasionner.

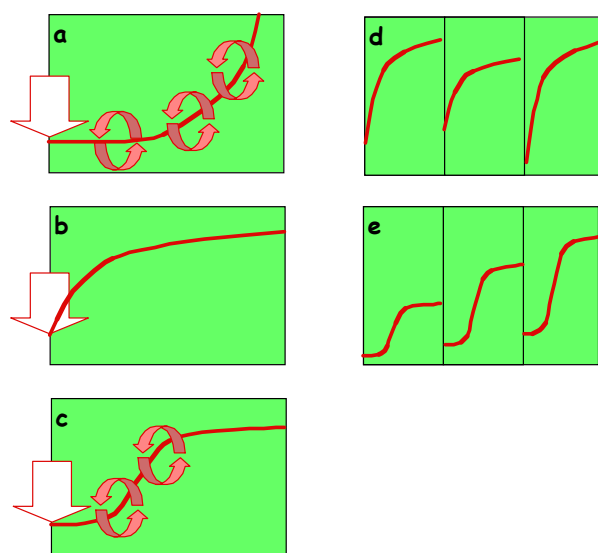


Figure 4.1-1. Dynamiques exponentielle (a), monocyclique (b), polycyclique (c), et polyétiques (d, e)

Les flèches de grande dimension en début de cycle représentent un influx, ou la mobilisation, de populations initiales. Les flèches en boucle représentent des processus monocycliques.

Les processus exponentiels et monocycliques résultent à la fois d'un influx initial et de processus monocycliques successifs, tandis que ces derniers font défaut dans le cas de dynamiques monocycliques. Les dynamiques polyétiques résultent de la concaténation (au cours de générations d'hôtes successifs, au cours des années ou des saisons) de dynamiques monocycliques (d) ou polycycliques (e) (Savary 2005).

A l'échelle d'un cycle végétatif, trois grands types de dynamiques de bio-agresseurs existent : exponentielle (a), monocyclique (b) et polycyclique (Savary, en préparation) (figure 4.1-1). Ces trois grands types se combinent à deux types de dynamiques à l'échelle de cycles végétatifs successifs : polyétique (figure 4.1-1, d et e) ou non.

Le type de dynamique a, exponentiel, présuppose (i) une multiplication (cycles) du bio-agresseur au cours du cycle végétatif, et (ii) la disponibilité illimitée de la ressource alimentant cette dynamique (spécialement, de sites dans le peuplement végétal). A ce second titre, ce prototype est un modèle d'école, rarissime dans la nature. Le type de dynamique (b) présuppose (i) l'absence de multiplication du bio-agresseur au cours du cycle végétatif, et (ii) une ressource limitée. Le type de dynamique (c) présuppose (i) l'existence d'une multiplication du bio-agresseur au cours du cycle végétatif, et (ii) une ressource limitée. Ce sont ces deux derniers types, et leurs combinaisons, qui sont couramment rencontrés.

L'existence d'une dynamique au cours de cycles végétatifs successifs est fortement dépendante de la capacité du bio-agresseur à survivre entre deux cycles, et de la mise en place successive de peuplements végétaux cultivés où il soit susceptible de se développer. Ceci est exprimé par différents degrés de polyétisme des dynamiques de bio-agresseurs. Deux niveaux de polyétismes (faible ou fort) peuvent par exemple être croisés avec deux types de dynamiques au cours d'un cycle végétatif (monocyclique ou polycyclique), et quatre types généraux sont envisagés. Quatre cas de figure sont ainsi envisageables :

- A- polyétisme faible - dynamique monocyclique
- B- polyétisme fort - dynamique monocyclique
- C- polyétisme faible - dynamique polycyclique
- D- polyétisme fort - dynamique polycyclique

Cette catégorisation indique que dans certains cas les dynamiques au cours de cycles végétatifs successifs sont connectées ; alors que dans d'autres, ils ne le sont pas. Il indique également que, selon le type de dynamique au cours du cycle végétatif (monocyclique ou polycyclique), le degré de concaténation varie.

A nouveau : il est essentiel d'insister ici sur le fait que la partition "monocyclique" - "polycyclique" est seulement destinée à générer un cadre de réflexion. Il y a plusieurs raisons pour mettre en garde le lecteur :

- 1) de nombreuses publications montrent que cette dichotomie est, souvent invalide : (i) on a par exemple souvent dit, à tort, que tous les parasites telluriques étaient monocycliques ; (ii) un organisme vivant s'adapte à son milieu ; un mode majeur d'adaptation est une inflexion des modes de reproduction ; et les bio-agresseurs de plantes n'échappent pas à la règle, avec d'important changements de mode de survie et de modification ; et (iii) beaucoup de bio-agresseurs occupent des positions intermédiaires : beaucoup sont partiellement monocycliques, ou faiblement polycycliques.
- 2) en pratique, des erreurs de gestion importantes sont dues à des notions préconçues sur les cycles biologiques, faute de connaissances suffisantes, ou par interpolation abusive.

Le tableau 4.1-2. donne quelques illustrations de ces différentes catégories.

| | Degré de polyétisme | |
|------------------------|--|---|
| | Faible | Fort |
| Dynamique monocyclique | | <ul style="list-style-type: none"> - certaines adventices - certains bio-agresseurs telluriques (nématodes) - pathogènes de l'appareil aérien à survie tellurique - certaines maladies transmises par arthropodes |
| Dynamique polycyclique | <ul style="list-style-type: none"> - parasites biotrophes de l'appareil aérien - certaines maladies transmises par arthropodes | <ul style="list-style-type: none"> - pucerons des céréales - oïdium de la vigne - certaines adventices - certaines maladies transmises par arthropodes |

Tableau 4.1-2. Exemples de bio-agresseurs classés selon des dynamiques correspondant à deux niveaux de polyétismes croisés avec deux types de dynamiques au cours d'un cycle végétatif.

Les méthodes de gestion des populations de bio-agresseurs peuvent être classées en deux grandes classes : celles destinées à réduire les populations initiales, x_0 (en début de cycle végétatif) et celles destinées à ralentir la vitesse apparente d'accroissement d'une population, r (en cours de cycle végétatif).

Le tableau 4.1-3. indique que le contrôle des populations initiales de bio-agresseurs est spécialement efficace pour la gestion des populations dans le cas où l'on a affaire à un degré de polyétisme fort (la dynamique d'une saison est très fortement dépendante de celle de la saison précédente, à cause de la population résiduelle qu'elle a générée), et lorsque la dynamique est de type monocyclique (une seule phase de multiplication des organismes en cours de saison). Une limitation de x_0 aura également un effet important, mais sensiblement moindre, lorsque la dynamique est polycyclique avec un niveau de polyétisme élevé.

Le tableau 4.1-3. indique également que la réduction de la multiplication de la population d'organismes, représentée par r , sera spécialement efficace lorsque le degré de polyétisme est faible (quelle que soit la dynamique saisonnière : monocyclique ou polycyclique), et modérément efficace lorsque le degré de polyétisme est fort si la dynamique saisonnière est polycyclique.

| | Degré de polyétisme | |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | Faible | Fort |
| Dynamique monocyclique | $x_0 : 0 \text{ à } +$ $r : +++$ | $x_0 : +++$ $r : +$ |
| Dynamique polycyclique | $x_0 : 0$ $r : +++$ | $x_0 : +$ $r : ++$ |

Tableau 4.1-3. Typologie des modes de gestion exprimés en niveaux de contrôle (0 à +++) obtenus par des actions sur x_0 et r , selon les niveaux de polyétismes croisés avec le types de dynamiques au cours d'un cycle végétatif.

Ces éléments amènent à un certain nombre de conclusions :

1- le contrôle des tailles de populations initiales (x_0) n'est efficace, dans l'absolu (voir remarque 1 ci-dessous) que dans un nombre limité de types de dynamiques. Mais ces types sont, au plan agricole, très importants, correspondant souvent à des bio-agresseurs responsables de pertes de récoltes pouvant être très importantes ;

2- les effets d'une réduction de r semblent concerner une grande majorité de cas, mais il est nécessaire de mieux qualifier ces effets, ce que nous faisons sommairement dans la remarque 2, ci-dessous.

Remarque 1 : les conclusions ci-dessus ne font pas référence à l'interaction des effets d'actions sur r et x_0 - c'est l'un des défauts typiques de ce genre de typologie. En réalité, ces interactions sont souvent très fortes, largement utilisées en agriculture, et très efficace. De bons exemples sont constitués par (1) la qualité des semences utilisées en grande culture, et le soin donné à veiller qu'elles ne comportent pas de semences d'adventices, (2) la certification des plants de pomme de terre, et le gain considérable qui en est généré par l'emploi de plants certifiés pour le contrôle des maladies virales, à condition qu'il soit mis en œuvre sur de très grandes surfaces, comme c'est le cas en France, (3) l'importance des traitements fongicides sur semences de céréales, qui constituent une barrière très efficace et reconnue vis-à-vis de maladies systémiques (carie du blé)³, mais vraisemblablement aussi un frein mal reconnu à l'encontre de maladies dont les caractéristiques sont typiquement polycycliques.

Remarque 2 : la réduction de r peut être la traduction d'actions très nombreuses. L'effet trivial est celui des pesticides, employés dans un contexte de décision tactique. Mais beaucoup d'autres effets s'ajoutent :

- celui de la résistance variétale partielle (ou, analogue en effet, des associations variétales) ; celui de la gestion de l'alimentation minérale du peuplement, le rendant moins vulnérable aux infections ;
- celui de la gestion de la structure du peuplement (par exemple, densité de semis, tailles, effeuillage) le rendant plus ou moins propice à la multiplication des bio-agresseurs ;
- celui du mode d'irrigation ; par exemple.

En réalité, les pratiques culturales sont virtuellement toutes, à des degrés divers, susceptibles d'affecter les dynamiques de bio-agresseurs. Cet élément est particulièrement bien documenté par exemple en phytopathologie par la synthèse de J. Palti (1981).

³ G. Raynal, communication personnelle.

4.1.4. Quantification de la nuisibilité des bio-agresseurs

Un canevas simple peut être utilisé, qui suit les points suivants (Zadoks, 1985 ; Savary, 1991) :

- une épidémie n'est pas certaine ; pour qu'elle se produise, il faut nécessairement qu'un certain nombre de conditions soient réunies dans le tétraèdre Peuplement végétal - Bio-agresseurs - Environnement - Homme ;
- il est postulé qu'une épidémie provoque des dégâts, c'est-à-dire un dysfonctionnement du peuplement végétal lié à l'activité biologique des bio-agresseurs (on pourrait imaginer une épidémie sans dégâts ; mais le statut de bio-agresseur de l'organisme en cause serait discutable et n'est donc pas envisagé ici) ;
- qu'une épidémie provoque un dommage, c'est-à-dire, une perte de récolte détectable, et *a fortiori* une perte de récolte supérieure à un certain seuil n'est pas certain ; cela dépend d'un ensemble de facteurs et d'interactions du système, et en particulier des interactions Peuplement végétal - Bio-agresseurs à l'échelle populationnelle et dynamique (dynamique des dégâts dans le temps ; physiologie du peuplement végétal exposé à ces dégâts) ;
- qu'une perte de récolte occasionne une perte économique pour l'agriculteur n'est pas une certitude ; cela dépend : (1) des investissements consentis à la production, (2) du dommage (des pertes de récoltes) occasionné, et (3) de la valeur du produit récolté. Ces trois éléments sont fluctuants. Ces éléments sont résumés dans la figure 4.1-2.

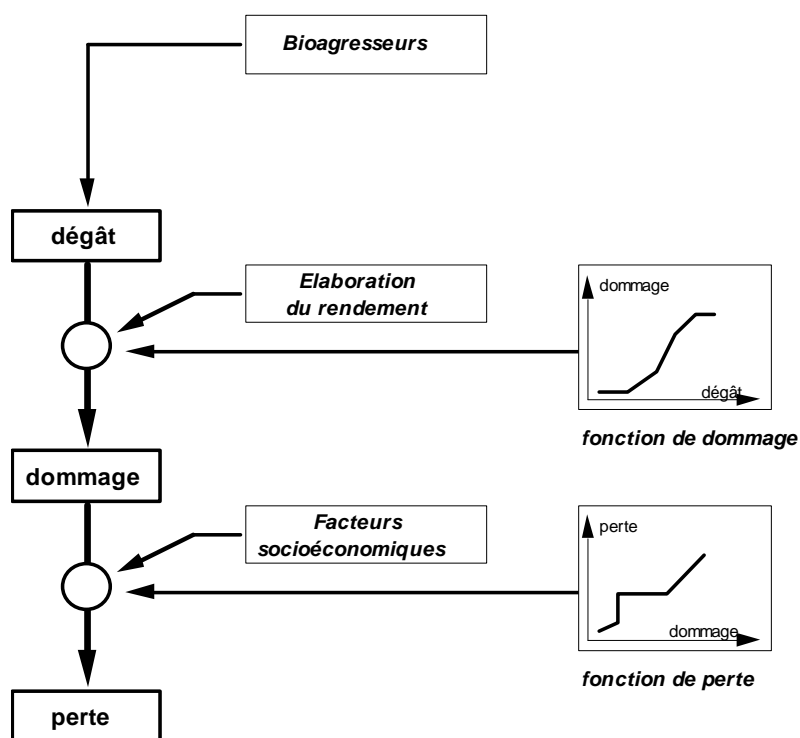


Figure 4.1-2. Relations entre bio-agresseur (et leur dynamique), dégâts (visibles et mesurables dans le peuplement), dommage (pertes de récolte) et perte (perte économique). La transition entre dégât et dommage dépend d'une part du processus d'élaboration du rendement et d'une fonction de dommage ; la relation entre dommage et perte dépend d'une part de facteurs socio-économiques et d'une fonction de perte (Source : Savary, 1991).

4.1.5. Dégât, dommage, et perte ; fonction de dommage et fonction de perte

Le canevas ci-dessus (Zadoks, 1985 ; Savary, 1991) souligne le risque qu'il y aurait à confondre, ou à assimiler, épidémie et perte de récolte (dommage), puisqu'il s'agit de phénomènes différents et dont les déterminants sont en principe distincts. Ce risque n'est souvent pas évité dans la recherche agronomique ; et le néologisme "nuisibilité" contribue malheureusement à ces confusions. Hormis les concepts évoqués ci-dessus, deux éléments sont utiles pour éviter cette confusion : (1) les dispositifs expérimentaux qui sont utilisés, qui doivent être spécifiques de l'objectif visé (soit analyse épidémiologique, soit quantification des pertes de récolte), et (2) les mesures, qui sont effectuées, qui ne sont pas interchangeables (voir ci-dessous).

Une fonction de dommage exprime les pertes de récoltes mesurées dans un peuplement végétal en fonction de la quantité de dégât. La construction d'une telle fonction exige la définition préalable du système envisagé (souvent, une partie d'un peuplement végétal cultivé et sa production finale, d'où l'expression commune des pertes de récoltes en biomasse par unité de surface, voir ci-dessous). Elle exige également (1) la mesure des performances du peuplement, (2) la mesure des performances accessibles de ce même peuplement, ainsi que (3) du dégât avec une méthode appropriée (voir ci-dessous).

La fonction de dommage joue un rôle central pour la protection des plantes cultivées contre leurs bio-agresseurs : c'est elle en effet qui sous-tend la théorie du seuil en protection des cultures (Zadoks, 1985).

Une fonction de perte exprime la relation entre niveaux croissants de dommage et les pertes économiques qui s'ensuivent. La construction de cette fonction dépend à son tour des mesures de dommages effectuées et de celles des pertes économiques. Alors que la notion de fonction de dommage a été mise en œuvre d'une manière systématique en protection des cultures, et opérationnalisée dans une très large gamme de pathosystèmes, très peu d'études en protection des cultures abordent cette fonction malgré son intérêt pratique (apparemment) évident.

Dans un certain nombre de cas (certaines maladies de la vigne, certains ravageurs sous serre, certains bio-agresseurs des cultures florales), la qualité du produit végétal, ou la vulnérabilité du peuplement, est telle que la fonction de dommage se réduit à seulement deux possibilités : c'est un signal carré, 0-1, oui-non. Dans ce cas, c'est d'emblée la fonction de perte (qualitative et financière) qui constitue le support de la protection.

4.1.6. Quantification des dégâts

Il existe un corpus important de méthodes pour mesurer les dégâts occasionnés par les bio-agresseurs des cultures (Chiarappa, 1971, 1980 ; Teng, 1980). Ces méthodes font essentiellement appel à des mesures effectuées au sein du peuplement végétal. Pour les dégâts de l'appareil aérien des clés existent qui permettent d'estimer d'une manière non destructive les dégâts occasionnés par différents arthropodes phytophages, y compris, par exemple, les miellats de pucerons sur céréales, par les agents pathogènes, ou par divers animaux phytophages. Pour les dégâts occasionnés à l'appareil racinaire, des méthodes similaires existent, qui sont nécessairement destructives dans la plupart des cas. Ces mesures font communément intervenir les notions de prévalence, d'incidence et de sévérité. Ces notions, nées de la recherche phytopathologique, sont parfaitement adaptables à l'ensemble des bio-agresseurs d'une culture (Savary *et al*, 1994).

Le cas des adventices, probablement la principale contrainte biotique à la réalisation de rendements accessibles pour un très grand nombre de productions de plein champ annuelles, paraît comparativement mal instrumenté. Diverses méthodes existent néanmoins (Chiarappa, 1980), parmi lesquelles la densité d'adventices par m², leur biomasse par m², et leur distribution spatiale par rapport au peuplement cultivé.

Le cas des maladies virales mérite une mention spéciale, où beaucoup d'études ont tenté de relier l'intensité des symptômes aux pertes de récoltes. Pour tout un ensemble de raisons, dont la subjectivité de la mesure de cette intensité (appelée souvent "sévérité" des symptômes), ce type d'approche n'est plus couramment employé ; l'incidence de maladie est devenue une norme communément admise (Barnett, 1986).

La mesure des dégâts a, en protection des plantes, des objectifs clairement distincts. Essentiellement, ces mesures sont destinées à : (1) étudier la progression des dégâts au cours du temps en vue d'une analyse dynamique ; (2) comparer des génotypes dont les résistances peuvent différer ; et (3) analyser la relation dégât-dommages. Il y a un véritable péril à confondre ces objectifs : ces objectifs étant distincts, ils font appel à des mesures différentes (Zadoks et Schein, 1979). Ainsi, une mesure, pertinente pour l'analyse des relations dégâts-dommages, peut ne pas permettre de distinguer des différences de résistance génétiques pourtant réelles. De la même manière, des mesures de résistance (souvent exprimées par des notes) sont souvent inadéquates pour mesurer la progression de dégâts au cours du temps, ou pour estimer des pertes de récolte.

4.1.7. Quantification du dommage

La littérature scientifique est riche de méthodes expérimentales pour quantifier les dommages (pertes de récoltes). Les travaux de Large et de James fournissent les fondements d'une quantification des dégâts occasionnés dans un peuplement végétal (Large, 1966 ; James, 1974). Ces éléments concernent essentiellement la mesure de dégâts occasionnés par des pathogènes sur le feuillage, les tiges, les racines et tubercules, et les fruits. Ils ont ensuite été complétés par un manuel couvrant les dégâts causés par la plupart des bio-agresseurs des plantes (Chiarappa, 1971, 1980).

Des méthodes existent pour mesurer le dommage (pertes de récoltes) en conditions expérimentales. L'ouvrage édité par Teng (1987) donne une revue assez complète des dispositifs expérimentaux, des techniques (taille des parcelles, unités d'observation, procédure d'échantillonnage, infestations artificielles, inoculations, traitements) qui peuvent être utilisés en routine. Ces méthodes ne recouvrent pas tous les cas possibles. Certains pathosystèmes s'avèrent particulièrement récalcitrants à la quantification du dommage, en particulier lorsqu'il s'agit de syndromes occasionnés par une combinaison de bio-agresseurs (par exemple, nématode et champignon) telluriques. Le cas de la "mort subite" de la pomme de terre (Francl *et al*, 1987, 1990) est particulièrement exemplaire, fournissant à la fois des protocoles expérimentaux et une méthode fiable, et probablement largement généralisable, pour partitionner les rôles des différents protagonistes. Le cas des maladies virales est également délicat ; les travaux sur le haricot (Hampton, 1975) ont, parmi les premiers, permis de clarifier les démarches possibles, et d'écartier la notion de "sévérité de symptômes" à quelques cas où elle a encore un sens.

On peut répertorier les différentes méthodes disponibles ainsi :

- Par des enquêtes de terrain. Beaucoup d'enquêtes ont été menées au Royaume-Uni (Large, 1966 ; James, 1969 ; King, 1977, 1980) sur les céréales, qui ont historiquement contribué à établir les méthodes encore utilisées dans beaucoup de cas. Ces études essentielles, ont été suivies par d'autres, notamment sur le blé en Australie (Stynes, 1980) et aux Pays-Bas (Daamen *et al*, 1989), le pois aux Etats-Unis (Wiese, 1980), l'arachide en Côte d'Ivoire (Savary, 1987), le caféier (Avelino, 1999) et le sorgho (Walls *et al*, 1989) au Honduras, le riz en Asie (Savary *et al*, 2000a). Un point important concernant cette approche est qu'elle ne permet pas une mesure directe du rendement accessible, qui par définition ne peut pas être mesuré dans ce contexte. Des estimations prudentes peuvent être néanmoins effectuées. Il en découle une forte imprécision sur les pertes de récoltes estimées. Ce type de travail, extrêmement lourd et onéreux, est cependant d'une valeur inestimable pour caractériser les situations de production et les profils de bio-agresseurs.
- Par des expérimentations de terrain. Il s'agit de la démarche conventionnellement mise en œuvre. Elle est largement décrite dans les textes de référence, et obéit à des règles très claires et précises, notamment pour (1) éviter des interférences entre parcelles, (2) décrire une gamme suffisante et

nécessaire de niveaux de dégâts, (3) effectuer des mesures de rendement et de performances des peuplements qui aient un sens agronomique. Ces trois points sont principalement destinés à générer l'information la plus précieuse de ce type d'approche, celle d'un rendement accessible mesuré dans une situation de production spécifiée (Savary, 1991).

- Toute une gamme de modèles empiriques existe pour traiter ces données. Ils sont bien décrits dans l'ouvrage de P. Teng (1987), et une revue assez complète de ces modèles a été effectuée par Madden *et al.* (1995) où leurs avantages et inconvénients sont décrits. Des méthodes concernant des combinaisons de bio-agresseurs y sont également discutées.

Les années 1970-2000 ont vu le développement de tout un ensemble de modèles mécanistes, d'abord conçus pour analyser quantitativement les performances de peuplements végétaux, puis d'agrosystèmes entiers, puis des bio-agresseurs des peuplements. Une bonne partie de ces efforts sont résumés dans quelques ouvrages (Penning de Vries et Van Laar, 1982). Même s'il existe des différences dans leur expression, les concepts fondamentaux sont essentiellement analogues d'un groupe de recherche à l'autre. Ces techniques sont bien établies, et permettent des études à caractère stratégique, par exemple dans la définition d'idéotypes de variétés résistantes, l'analyse de scénarios de rotations, d'intrants (eau, nutriments, produits chimiques). Ce ne sont pas, comme on a voulu parfois les voir, des instruments de prévision ni de gestion tactique au quotidien, sur le terrain. Mais ce sont de formidables outils de recherche par leur potentiel à rassembler les disciplines, à structurer les programmes, à définir des protocoles expérimentaux, et surtout à identifier nos manques de connaissances. De bons instruments de gestion au quotidien (Zadoks, 1981b) en sont issus ; mais ce ne sont pas des modèles de simulation : ils synthétisent l'essentiel des notions présentes dans des modèles de simulation, mais ces notions y sont réduites à leur expression la plus simple possible, afin de permettre une utilisation pratique en temps réel.

4.1.8. Déterminants des pertes de récolte

Il n'est pas possible ni utile d'entrer ici dans le détail des déterminants des pertes de récolte. Ce qui suit se borne aux éléments qui paraissent fondamentaux pour permettre une mise en œuvre, en délaissant les éléments spécifiques (parfois très importants) propres aux caractéristiques particulières d'un pathosystème donné.

- Le dommage est lié au dégât x selon une fonction de dommage : $D = f(x)$. Typiquement, mais non obligatoirement, il s'agit d'une fonction croissante, et généralement monotone. Selon le pathosystème donné, cette fonction devra tenir compte du développement de l'hôte (et f pourra être établie pour un ou quelques stades de développement prédéfinis), ou non (les dégâts s'accumulent et augmentent le dommage progressivement ; souvent, les effets de doses de dégâts supplémentaires sont moins qu'additifs).
- Au milieu des années 80 (à cause de progrès liés à l'usage de modèles de simulation, et à cause de recherches expérimentales, par exemple (Rabbinge et Rijdsdijk, 1981 ; Savary et Zadoks, 1992)), il est devenu apparent que l'on pouvait également écrire que : $D = f(x, Y_a)$, où Y_a représente le rendement accessible. Cette formulation exprime la relation intrinsèque, indépendante du niveau de dégât x concerné, dans laquelle les pertes de récolte D sont fonction, pour un niveau de dégât donné, du rendement accessible. Il devenait alors apparent que *la perte de récolte pouvait être vue comme une conséquence du rendement accessible visé, donc de la situation de production (voir ci-dessous) concernée, donc des pratiques culturales utilisées. Les pratiques culturales devenaient alors en soi un élément déterminant des pertes de récoltes, parce qu'elles déterminent à la fois le rendement accessible et la vulnérabilité du peuplement végétal.*
- A la même époque, les acquis de terrain, des travaux expérimentaux et de simulation montraient que l'on pouvait également écrire :

$$D = f(x, y, Y_a),$$

où y représente le dégât occasionné par un (ou plusieurs) autre bio-agresseur (Zadoks, 1985).

Cette dernière équation a des répercussions importantes, puisqu'elle replace la théorie du seuil dans un contexte pratique : les seuils, invoqués comme instruments essentiels de la décision tactique en

protection des cultures, ne sont pas uniformément applicables partout : ils dépendent des situations de production qui déterminent le rendement accessible, et ils dépendent aussi de la présence d'autres bio-agresseurs provoquant des dégâts. Très peu d'études quantitatives ont pris le relais de cette vision, qui pourtant correspond à une réalité de terrain et à un besoin concret.

4.1.9. Définitions du risque en protection des cultures

Une définition tirée de l'industrie

Le terme "risque" est employé systématiquement dans le domaine, souvent sans définition précise. Une définition possible est celle de l'industrie (Rowe, 1980), qui a été utilisée pour le déploiement d'organismes destinés à la lutte biologique (De Jong *et al*, 1990), et qui a été proposée plus généralement en protection des cultures (Savary, 1991 ; Savary *et al* 1994) :

$R = P \times M$, où :

P est la probabilité du risque, c'est-à-dire la probabilité qu'une épidémie (une population de bio-agresseur) s'établisse (croisse et se multiplie) jusqu'à un niveau donné (puis décroisse) ;

M est l'amplitude du risque, c'est-à-dire les conséquences que cette dynamique peut avoir sur les performances du peuplement au sein d'un agrosystème, exprimée en termes de pertes de récolte par rapport à un niveau de rendement accessible spécifié ;

et R est le risque associé au bio-agresseur considéré.

Combinant la définition ci-dessus et les combinaisons de situations de production (S) et de profils de bio-agresseurs (B), la construction de tableaux croisés (S x B) est possible, pour chacun des éléments R , M , et leur produit, P .

Ces tableaux permettent alors de raisonner l'évolution des composantes du risque R associé à un ensemble de bio-agresseurs B compte tenu de l'évolution des situations de production S . Ce travail a été mené par exemple dans le cas du riz en Asie tropicale en utilisant des approches expérimentales et des modèles empiriques (Savary *et al*, 2000a ; Savary *et al*, 2000b), et des approches expérimentales et des modèles de simulation numériques (Willocoquet *et al*, 2004). Il en découle des domaines spécifiés où la protection des cultures constitue un surinvestissement, et d'autres au contraire où elle est fortement déficiente, justifiant un effort d'identification des bio-agresseurs responsables de pertes intolérables vis-à-vis des performances attendues, et de recherches vers un choix d'options de gestion nouvelles à envisager.

Une définition pragmatique

Une autre approche du terme *risque* fait référence :

- d'une part à la nature des épidémies, soit récurrentes et chroniques, soit ponctuelles et aiguës (voir ci-dessus) ;

- d'autre part aux conséquences de ces épidémies, soit correspondant à un dommage régulier, systématique, mais limité, soit correspondant à un dommage massif, éventuellement irrécupérable (s'agissant par exemple d'une production pérenne).

| | Epidémie chronique | Epidémie aiguë |
|----------------|--|---|
| Dommage limité | A - Stratégie de gestion visant à réduire les dommages récurrents et à accroître la viabilité du système | B - Cas ne nécessitant pas de stratégie particulière si les dommages sont peu importants et infréquents |
| Dommage massif | C - Contexte où la viabilité immédiate du système est en question, et où l'on doit reconsidérer la production végétale en tant que telle | D - Stratégie de gestion visant à prévenir les épidémies elles-mêmes, s'il est avéré que les dommages associés sont majeurs |

Tableau 4.1-4. Typologie du risque associé au développement d'une population d'un bio-agresseur en protection des cultures.

Les cellules A et D du tableau 4.1-4 se traduisent par des réponses, en termes de stratégies (si elles existent) ou de recherches nouvelles (si les stratégies n'existent pas). Naturellement, cette catégorisation en 4 cas seulement des risques en protection des cultures est une simplification. Elle peut être illustrée spécifiquement dans le cas d'une grande culture, d'une culture maraîchère, et d'une culture pérenne, par exemple.

Mais ce tableau amène à clairement distinguer les cas A des cas D. Dans les premiers, des options de gestion durable visant un effet au cours de cycles végétaux successifs, options qui probablement peuvent être cumulatives, sont à privilégier (et des exemples concernant la gestion des adventices sont ici typiques et très nombreux), alors que dans les seconds, les options de gestion doivent prioritairement prévenir plutôt que contrôler⁴. On peut également s'interroger sur la fréquence avec laquelle des cas de type A ont été gérés comme des cas de type D, en mettant de plus en œuvre uniquement des instruments destinés à contrôler immédiatement, plutôt qu'à prévenir.

4.1.10. Décisions et stratégies de gestion

Trois types de décisions peuvent être distingués en protection des cultures qui correspondent à des échéances plus ou moins brèves, mais aussi à des degrés de liberté plus ou moins importants (tableau 4.1-5). Les décisions tactiques sont en général dépendantes de décisions antérieures, relevant de stratégies court-terme et/ou long-terme, et spécifiquement, de l'itinéraire technique choisi (ainsi on traite, évidemment, parce que la variété que l'on a choisie est sensible à un ravageur). Au contraire, les décisions stratégiques long-terme relèvent d'un degré de liberté beaucoup plus grand, tout en ayant des implications beaucoup plus lourdes.

| Type de décision | Actions (exemples) |
|-------------------------|--|
| Tactique | <ul style="list-style-type: none"> • traiter • ne pas traiter <ul style="list-style-type: none"> • attendre |
| Stratégique court-terme | <ul style="list-style-type: none"> • choix de cette variété • choix de ce type de mise en place <ul style="list-style-type: none"> • choix de cet itinéraire technique |
| Stratégique long-terme | <ul style="list-style-type: none"> • choix d'un plan de sélection • définition d'un idéotype <ul style="list-style-type: none"> • choix d'une agriculture |

Tableau 4.1-5. Echelles de temps de la décision en protection des cultures.

La protection des cultures est impliquée dans les trois types de décisions (tableau 4.1-5) : dans les décisions tactiques, en technologies disponibles ou à déployer ; dans les décisions stratégiques court-terme, en technologies et en instrument pour optimiser leur combinaisons ; dans les décisions stratégiques long-terme, par des recherches orientées vers de nouveaux instruments de gestion, vers les impacts prévisibles de ces instruments dans un contexte variable, et par les priorités assignées aux programmes de recherches. La réalisation d'une expertise collective sur l'usage des pesticides en France participe donc ainsi d'une stratégie de long terme pour la protection des cultures.

⁴ On peut mentionner ici les travaux menés par l'INRA sur les systèmes serre, tant pour la production de légumes (tomates), et plus encore, florale (roses). Dans les deux cas, un objectif essentiel est de prévenir l'intrusion de propagules, ou d'immigrants de bio-agresseurs dans le système clos et régulé que constitue une serre (*Botrytis cinerea*, à la fois pour la tomate et la rose, et mouche blanche pour la tomate).

4.2. Méthodes de protection des cultures

4.2.1. Panorama des différentes méthodes de contrôle

Même si les données statistiques font, malheureusement, défaut pour décrire précisément dans quels systèmes de production, pour quelles productions végétales, et pour quels bio-agresseurs, les pesticides sont actuellement utilisés en France, la lutte chimique constitue actuellement la pratique dominante. Cette situation est dangereuse pour différentes raisons. La plus immédiate est qu'un équilibre entre les méthodes de contrôle disponibles devrait être recherché, ne serait-ce que pour permettre à chacune des options envisageables d'être développée ou déployée. Nous aborderons plus loin les difficultés qui surgissent aujourd'hui pour la mise en œuvre de méthodes non chimiques, l'une d'entre elles étant précisément la dominance des méthodes chimiques.

Afin de limiter les nuisances associées à l'utilisation systématique ou à l'abus d'usages de pesticides, deux orientations immédiates sont aujourd'hui envisagées : (1) proposer des produits phytosanitaires à plus faible impact (sur la santé humaine et animale, sur l'environnement), et/ou (2) réduire l'utilisation de ces produits. Le premier point est abordé dans un autre chapitre de l'expertise collective. Habituellement, on considère que la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires peut être obtenue soit (i) en raisonnant l'application de ces produits sur la base de seuils économiques de nuisibilité, et/ou (ii) en appliquant une combinaison de méthodes de lutte à effets partiels, qualifiées d'"alternatives", en complément (protection intégrée) ou en remplacement des méthodes chimiques habituelles.

Alors que parmi les raisons évoquées pour expliquer la forte dépendance de la production agricole aux produits phytosanitaires figure en bonne place l'absence de solutions alternatives non chimiques (Jansma, *et al*, 1993), nous tenterons de montrer que des méthodes de lutte alternatives à l'utilisation des pesticides sont possibles. Après avoir rappelé les méthodes disponibles pour le raisonnement des applications de pesticides, nous présenterons les méthodes alternatives selon quatre grandes catégories : la lutte par amélioration génétique, la lutte biologique, la lutte physique et la lutte par les pratiques culturales (figure 4.2-1).

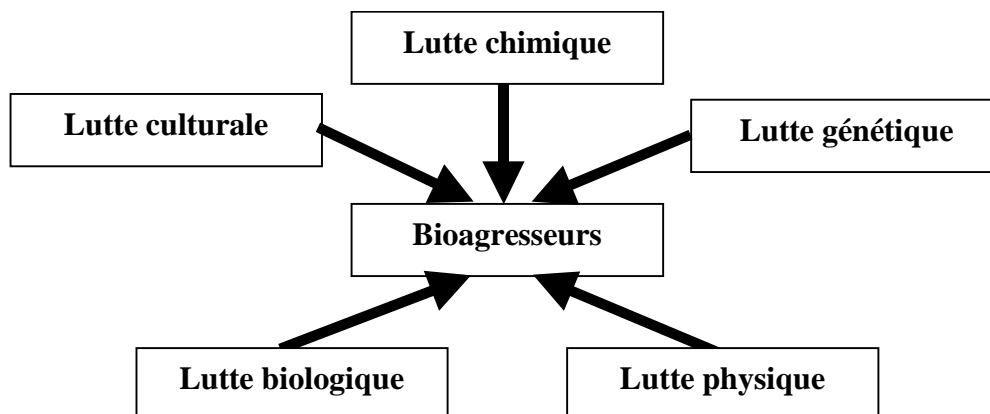


Figure 4.2-1. Les différentes méthodes de lutte contre les bio-agresseurs en production végétale.

Pour chacune de ces méthodes, nous rappellerons les principes de base, et nous présenterons leur efficacité et les obstacles à leur mise en œuvre à l'aide de différents exemples, notamment en grande culture (maladies, mauvaises herbes, et ravageurs principalement). Nous aborderons ensuite le concept de protection intégrée, le développement de son application en grande culture, depuis les années 50. Le tableau 4.2-1 présente une comparaison très synthétique de ces méthodes de lutte.

| | Méthode de lutte | | | | |
|---|--|---|---|---|--|
| | Chimique | Génétique | Biologique | Physique | Culturale |
| Début de l'usage généralisé en agriculture | XX ^e siècle | XX ^e siècle | XX ^e siècle | Avec l'agriculture | Avec l'agriculture |
| Homologation | Requise | Requise | Quelques cas | Non | Non |
| Nuisances / environnement | Elevées | Faibles (à élevées ? OGM) | Moyennes | Faibles | Faibles |
| Sciences en support | Chimie analytique et de synthèse, biologie, écotoxicologie | Génétique, amélioration des plantes, biologie moléculaire | Biologie moléculaire, biotechnologies, écologie | Ingénierie (mécanique, électrique, électronique), biologie | Agronomie, écologie, biologie |
| Action résiduelle (résidus) | Oui (variable) | Non | Oui si reproduction | Négligeable | Non |
| Possibilité d'utilisation avec une autre méthode | Oui (parfois difficile) | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Méthode active ou passive | Active | Passive | Active | Active et passive | Active et passive |
| Application en grandes cultures | Elevée | Moyenne à élevée | Faible | Faible à modérée | Moyenne |
| Application pour des cultures à fortes marges à l'hectare | Elevée | Moyenne à élevée | Modérée à élevée | Modérée à élevée | Moyenne |
| Sécurité pour la culture | Moyenne à élevée | Elevée | Elevée | Elevée (passive), faible (active) | Elevée |
| Main-d'œuvre requise | Faible | Faible | Elevée | Moyenne à élevée | Moyenne à élevée |
| Rendement de chantier (ha/h) | Elevé | Elevé (infini en théorie) | Variable | Elevé (passive), faible (active) | Variable |
| Site d'action | Appareil photosynthétique, système nerveux | Systèmes d'adaptation aux stress biotiques (résistance) | Systèmes d'adaptation aux stress biotiques | Systèmes d'adaptation aux stress abiotiques (croissance, survie...) | Systèmes d'adaptation aux stress abiotiques (esquive, compétition, microclimat...) |
| Impact géographique | Limité à élevé (chaîne alimentaire) | Limité (mais dispersion du bio-agresseur) | Colonisation d'habitats non visés | Restreint à la zone traitée | Restreint à la zone considérée |
| Quantité d'énergie requise | Elevée (production) | Faible | Faible | Faible (passive), élevée (active) | Faible à élevée |
| Matériel requis | Pulvérisateur terrestre ou aérien | Aucun | Peu ou pas | Machines nombreuses et variées, peu d'utilisations multiples de la même machine | Peu ou pas (non spécifique) |
| Marché actuel (2000) | 27 G€ | Non quantifié | Ca. 1.5% du marché des pesticides chimiques | Négligeable | Négligeable (conseil plutôt que produit) |
| Références scientifiques | Très abondantes | Très abondantes | Abondantes | Peu abondantes | Assez abondantes, mais souvent qualitatives |

Tableau 4.2-1. Principales caractéristiques des différentes méthodes de lutte (adapté de Panneton et al, 2000b).

4.2.2. Raisonnement de la lutte chimique

Raisonnement l'emploi des pesticides, c'est-à-dire, *fonder leur utilisation sur la nécessité objectivement mesurée d'en employer dans un contexte précis* diverge de la pratique, encore trop courante, d'une utilisation routinière et systématique (logique d'assurance). Le résultat du raisonnement est une *décision de type tactique*, prise après la mise en place du peuplement végétal, et assujettie à d'autres décisions amont (stratégiques court- et long-terme). C'est une première étape pour réduire l'usage de pesticides, soit en diminuant la fréquence d'application et/ou en diminuant les quantités épandues. Les options incluent : (1) une réduction de la fréquence des traitements, (2) une réduction des doses appliquées, (3) le choix de matières actives dont l'impact environnemental est moindre, et (4) le choix des périodes d'application tenant compte des risques environnementaux. Les points (1), (2) et (4) de cette liste sont abordés ci-dessous ; le point (3) est spécialement abordé dans un autre chapitre de l'expertise (Chapitre 3).

4.2.2.1. Réduction de la fréquence de traitement

Cette réduction peut être obtenue par l'utilisation de méthodes d'évaluation du risque :

- à l'échelle micro-régionale (avertissements de la Protection des Végétaux basés sur des modèles épidémiologiques ou des piégeages : insectes, spores pour les maladies fongiques de l'appareil aérien) ;
- à l'échelle de la parcelle (kits diagnostic pour maladies du pied, tableaux de bord basés sur les risques connus, par exemple profil de flore dominant, observation directe – notations globales, comptages, pièges ou utilisation d'images aériennes parfois combinés à des règles de décision sur la base de seuils de nuisibilité économique).

Il est important de noter que la notion de risque envisagée dans ces méthodes est, de manière dominante, le risque d'épidémie (*P*), et très rarement le risque en termes de pertes de récolte (*R*). Dans l'essentiel des cas, les méthodes employées ne considèrent ni le niveau de rendement accessible, ni l'existence éventuelle d'autres bio-agresseurs, qui sont de nature à faire varier les seuils d'intervention, d'où une protection chimique éventuellement inadéquate, abusive, ou insuffisante.

4.2.2.2. Réduction des doses d'application par unité de surface cultivée

Cette réduction des doses élémentaires, qui concerne principalement les adventices et les maladies foliaires, consiste à adapter l'intensité du traitement à la nature, à l'état (stade, abondance) et à la distribution spatiale des bio-agresseurs qui sont visés. L'on évoque souvent le risque de sélection d'individus résistants par ce type de pratique dont l'objectif initial est la réduction de la quantité de matière active par ha. Cette réduction peut également être obtenue par un traitement de précision (foyers de maladies, taches de mauvaises herbes) qu'il s'agisse d'une détection automatique (capteurs embarqués) ou d'un ajustement par l'utilisateur lors de l'application.

4.2.2.3. Choix des périodes et des conditions d'application des pesticides

Il s'agit du champ traditionnel du raisonnement. La recherche d'une efficacité maximale des applications pesticides (date optimale, utilisation d'adjuvants, mélange de matières actives, prise en compte de la pluviométrie, de la température et de l'hygrométrie pour l'application, matériels de pulvérisation mieux réglés et plus fiables) contribue à limiter l'application excessive de matières actives (Caseley, 1990). La qualité du traitement dépend ainsi de l'organisation du travail et de la possibilité d'intervenir le moment voulu dans les meilleures conditions.

4.2.3. Les résistances obtenues par la sélection variétale

L'amélioration variétale a notamment pour objectif une résistance accrue aux bio-agresseurs. C'est, et de très loin, cet instrument qui, à l'échelle globale, a été à la fois le mieux adopté par les agriculteurs, le plus efficace à grande échelle, tout en étant dénué des impacts négatifs sur la santé humaine et sur l'environnement qui sont attachés à l'usage de pesticides. En France, la sélection de variétés résistantes aux maladies a été à l'origine d'un progrès important tant pour le blé (Trottet et Doussinault, 2002) que pour le tournesol (Vear *et al.*, 2003).

Pour reprendre les termes évoqués au début de ce chapitre, l'amélioration variétale peut cibler deux grands types d'objectifs :

- une résistance génétique accrue vis-à-vis du bio-agresseur, qui contribue à empêcher, à ralentir, ou à rendre moins efficace son cycle de reproduction ; différents types de résistance, mono-, oligo-, ou polygénique peuvent y être associés ; cette résistance annule ou réduit la vitesse de reproduction du bio-agresseur ;

- des caractéristiques morphologiques qui rendent la plante-hôte dans son peuplement moins vulnérable aux dégâts occasionnés par un niveau de population de bio-agresseurs donné ; les variétés obtenues sont sensibles au bio-agresseur considéré ; mais celles dont les performances sont supérieures à celles d'une référence présentant un niveau de dégât égal sont qualifiées de tolérantes.

Alors qu'énormément de travaux se sont attachés au premier de ces deux objectifs, relativement peu ont concerné le second.

Récemment, des variétés transgéniques (OGM) ont été mises au point en grande culture, qu'elles soient résistantes à un herbicide non sélectif ou nocives pour un ravageur. D'autres voies que la transgénèse, mieux acceptées, ont conduit à des résultats semblables (ex. variétés de tournesol résistantes à l'imidazolinone, herbicide utilisé pour contrôler l'orobanche).

Une autre voie consiste à associer des variétés différant par leur sensibilité à un pathogène (et leurs gènes de résistance).

4.2.4. Lutte biologique

Le terme "lutte biologique" recouvre différents concepts selon les disciplines impliquées dans la protection des cultures (Nordlund, 1996). Afin de préciser notre point de vue, nous suivrons Ferron (2000) et retiendrons la définition officielle donnée par l'Organisation Internationale de Lutte Biologique et intégrée contre les animaux et les plantes nuisibles. La lutte biologique consiste à utiliser des organismes vivants pour prévenir ou réduire les dégâts causés par des ravageurs (OILB-SROP, 1973). Nous adopterons cette acception en substituant toutefois le terme "bio-agresseurs" au terme "ravageurs" de manière à élargir la portée de la définition à l'ensemble des ennemis des cultures. L'agent de lutte (ou auxiliaire) peut être un parasitoïde, un prédateur, un agent pathogène (champignon, bactérie, virus, ou protozoaire), ou un concurrent du bio-agresseur visé.

On distingue classiquement trois types de lutte biologique :

- a) La lutte biologique classique, ou lutte par introduction-acclimatation, consiste à introduire une nouvelle espèce dans un environnement afin de contrôler les populations d'un ennemi des cultures ;

- b) La lutte biologique augmentative consiste à augmenter la taille des populations d'ennemis naturels, soit par des lâchers massifs (lutte inondative) ou par lâchers en petite quantité, l'auxiliaire devant s'établir, se multiplier et coloniser une zone donnée (lutte inoculative) ;

- c) La manipulation environnementale permet de favoriser les effets bénéfiques des espèces indigènes d'ennemis naturels (d'après Ferron, 2000 et Boivin, 2001).

Selon la définition que nous avons retenue, la lutte autocide, ayant pour principe l'introduction d'un grand nombre de mâles stériles dans une population naturelle (Jourdeuil *et al.*, 1991) est également une composante de la lutte biologique. En revanche, l'utilisation de produits chimiques extraits de plantes (tels des insecticides d'origine végétale) ou de micro-organismes (tels les formulations de *Bacillus thuringiensis* ne contenant que l'exotoxine du Bt et non plus des bactéries vivantes) ne peut être qualifiée de méthode de lutte biologique au sens strict (Ferron, 2000 ; Boivin, 2001) : il s'agit de bio-pesticides.

Le développement d'une méthode de lutte biologique contre un ravageur nécessite quatre étapes : 1) étudier la biologie du ravageur ; 2) étudier la biologie des ennemis naturels du ravageur ; 3) mettre au point une production répondant au besoin des expérimentations tant au laboratoire qu'en conditions naturelles ; 4) valider les expérimentations en laboratoire par des tests en plein champ (Brunel et Fournet, 2002).

4.2.5. Les méthodes de lutte physique

Les méthodes de lutte physique incluent toutes les techniques dont le mode d'action primaire ne fait intervenir aucun processus biologique ou biochimique (Panneton *et al.*, 2000). On peut schématiquement répartir ces techniques en quatre grandes catégories : la lutte thermique, la lutte électromagnétique, la lutte mécanique, et la lutte pneumatique.

4.2.5.1. La lutte thermique

Elle consiste à causer des blessures internes aux ennemis des cultures visés (mauvaises herbes, ravageurs, pathogènes) par échauffement létal ou par diminution de la température en dessous du point de congélation (Laguë *et al.*, 2000). Ce mode de lutte nécessite une bonne connaissance des seuils de sensibilité thermique des bio-agresseurs, mais également de la culture à protéger si l'opération est effectuée pendant la culture. Plusieurs méthodes sélectives ont été expérimentées avec succès : charançon de la luzerne, pyro-désherbage en post-levée dans le maïs et la pomme de terre (respectivement Blickenstaff *et al.*, 1967 ; Lien *et al.*, 1967 ; Hansen *et al.*, 1968 ; cités par Laguë *et al.*, 2000). En Europe (Daar, 1987) et aux Etats-Unis (Kepner *et al.*, 1978), après la seconde guerre mondiale, l'apparition des pesticides dans l'agriculture a entraîné le déclin des méthodes thermiques de lutte. Le désherbage thermique (eau chaude, flamme, infrarouge) des cultures en rangs a fait l'objet de nombreux travaux méthodologiques dans le cadre de l'agriculture biologique (travaux de J. Ascard en Suède).

4.2.5.2. La lutte électromagnétique

Elle repose sur l'interaction entre un rayonnement électromagnétique, ou un courant, et la matière constituant l'ennemi des cultures visé (insectes, mauvaises herbes, pathogènes). Cette méthode ne cause pas de dommage aux cultures hôtes et ne laisse pas de résidus, mais reste peu développée pour des raisons de coût (Lewandowski, 2000).

4.2.5.3. La lutte mécanique

Elle concerne essentiellement la maîtrise des plantes adventices et des insectes. Dans le premier cas, différentes modalités de lutte mécanique sont possibles : travail du sol, fauche, utilisation de paillis, désherbage manuel et inondation. On a estimé que 50 à 70% des producteurs agricoles de la planète désherbaient manuellement (Hill, 1982 ; Wicks *et al.*, 1995, cités par Cloutier et Leblanc, 2000). En France, la lutte mécanique contre les adventices par le travail du sol est la méthode de lutte physique la plus utilisée en grandes cultures.

Pour la maîtrise des insectes, l'utilisation de barrières physiques se révèle une méthode intéressante. Cette technique consiste à rendre plus difficile l'arrivée de ravageurs dans une zone de production en l'entourant ou en obstruant le passage. Cette technique est plus efficace en culture sous serre qu'en grandes cultures, mais des exemples positifs d'utilisation de barrières physiques contre les insectes nuisibles existent. Par exemple, une enceinte en acier a été utilisée pour protéger le blé et la luzerne de la sauterelle mormone (*Anabrus simplex* Haldeman), ravageur important dans le nord-ouest des Etats-Unis (Metcalf et Metcalf, 1993 ; cité par Boiteau et Vernon, 2000). Un ados sur lequel on répand régulièrement du créosote permet de contenir la punaise des céréales (*Blissus leucopterus leucopterus* Say) qui attaque les graminées, le blé et le maïs aux Etats-Unis. Une pellicule de plastique s'est

révélée plus efficace pour lutter contre les insectes de la pomme de terre que l'application d'insecticides (Paparatti, 1993, cité par Boiteau et Vernon, 2000). De même, les barrières anti-doryphores se révèlent efficaces pour protéger les champs de pomme de terre (Boiteau et Vernon, 2000). Les pucerons et d'autres insectes, vecteurs de nombreuses viroses peuvent également être contrôlés par des paillis, filets, feuilles de plastique jaune (Bégin *et al.*, 2000). Les brise-vent des exploitations agricoles, généralement des haies ou des rangées d'arbres modifient la circulation de l'air et influencent donc fortement la dispersion des insectes dans un paysage (Boiteau et Vernon, 2000).

4.2.5.4. La lutte pneumatique

Elle consiste à utiliser l'air en mouvement (soufflerie et/ou aspiration) pour éliminer les insectes ravageurs (Khelifi *et al.*, 2000). Cette technique dépend fortement de l'insecte visé et de la culture à protéger. Elle s'est révélée efficace dans certains cas (mouches blanches, *Aleurodidæ* ; punaise terne (*Lygus lineolaris*) ou a donné des résultats mitigés : doryphore de la pomme de terre ; *Leptinotarsa decemlineata* Say ; Khelifi *et al.*, 2000). C'est surtout sur le continent nord-américain que cette approche a été la plus étudiée, en France son utilisation est marginale en grandes cultures. Les inconvénients de ce système de lutte sont le compactage du sol, la destruction des auxiliaires, et les dommages mécaniques causés aux cultures (Moore, 1990 ; cité par Khelifi *et al.*, 2000).

4.2.6. Les méthodes associées au système de culture : le contrôle cultural

Il s'agit de la méthode de lutte la plus ancienne utilisée par l'homme (Zadoks, 1993a), avec la lutte physique. Puisque chaque élément du système de culture est susceptible d'interagir sur l'état sanitaire des cultures (Zadoks, 1993a), il apparaît naturel de chercher à utiliser ces effets comme leviers pour contrôler les ennemis des cultures. La lutte culturale peut être définie comme une adaptation du système de culture (au sens de Sebillotte, 1990) pour limiter le développement des ennemis des cultures (Bajwa et Kogan, 2004), de manière préventive ou curative. Implicitement, cette définition implique que les éléments du système de culture concernés par la lutte culturale ne portent ni sur la lutte chimique, biologique, génétique ou physique (en particulier le désherbage mécanique). Cette méthode de lutte fait appel à des modifications de la succession des cultures, à l'implantation de couverts intermédiaires, ou de cultures associées, à des modifications des dates et des densités de semis, des dates de récolte, de la fertilisation (N, P, K) et des amendements (chaulage), de l'irrigation ou du drainage (Zadoks, 1993a ; Flint et Gouveia, 2001 ; Delos *et al.*, 2002). Le Tableau 4.2-2 récapitule les principaux éléments de lutte culturale pouvant être utilisés pour contrôler les bio-agresseurs.

Les avancées en matière de protection des cultures à l'aide d'applications de produits phytosanitaires, en France, ont réduit la lisibilité et l'efficacité des méthodes prophylactiques en protection des cultures. Les effets du système de culture, hors éléments de lutte génétique, biologique, chimique, ou physique, se trouvent en effet masqués si les pratiques incluent l'application régulière de produits phytosanitaires, contrôlant totalement une ou plusieurs populations d'ennemis des cultures. La remise en cause de l'usage intensif des pesticides en agriculture a récemment entraîné un regain d'intérêt pour l'analyse de ces effets sur les bio-agresseurs.

En ce qui concerne les champignons pathogènes, la lutte culturale passe par une réduction de l'inoculum primaire, par une limitation des contaminations, des dégâts et des dommages. L'inoculum présent sur la parcelle (souvent conservé sur les résidus de récolte) est un facteur important pour l'apparition des maladies telluriques. Dans ce cas, l'histoire culturale de la parcelle (fréquence des cultures-hôtes, mode de gestion des résidus de récolte, travail du sol...) devra être considérée pour évaluer le risque d'apparition des symptômes (Colbach *et al.*, 1994). Dans le cas des maladies à dissémination aérienne, les flux d'inoculum sont plus difficiles à maîtriser sans mettre en oeuvre une organisation micro-régionale des systèmes de culture. Par contre, à l'échelle de la parcelle, il subsiste 2 stratégies de protection à effet partiel, directement liées à la conduite de culture : (i) l'esquive par le

décalage des cycles culturaux (stades sensibles) et des périodes de dispersion des spores ; (ii) le rationnement végétatif, qui consiste à diminuer la réceptivité du couvert par un microclimat peu favorable, par exemple en réduisant la densité de peuplement ou en modérant la fertilisation (azotée) et/ou l'irrigation. Dans certains cas, il peut s'agir des seules méthodes efficaces contre les pathogènes (contournement de résistance, absence de variétés résistantes). On pourra se référer à plusieurs documents de synthèse pour une description plus complète des différentes composantes de la lutte culturale et de leurs effets sur le contrôle (direct ou indirect) des maladies : Palti, 1981 ; Herzog et Funderburk, 1986 ; Speight *et al.*, 1999 ; Landis *et al.*, 2000 ; Norris *et al.*, 2003 ; cités par Bajwa et Kogan, 2004 ; Flint et Gouveia, 2001 ; Meynard *et al.*, 2003 ; Delos *et al.*, 2004).

| Éléments de lutte culturale | Insectes | Mauvaises herbes | Maladies | Nématodes |
|--|----------|------------------|----------|-----------|
| Succession des cultures | X | X | X | X |
| Adaptation de la nutrition de la culture | X | X | X | X |
| Propreté des équipements agricoles | X | X | X | X |
| Adaptation de l'irrigation | X | X | X | X |
| Adaptation du travail du sol | X | X | X | X |
| Gestion des résidus de cultures | X | X | X | X |
| Choix des dates de semis et de récolte | X | X | X | X |
| Adaptation de la densité de semis et de l'écartement entre rangs | X | X | X | |
| Cultures pièges | X | | | |
| Manipulation de l'habitat pour favoriser les auxiliaires (haies, cultures de couverture, cultures associées, paillis...) | X | X | X | |
| Destruction des hôtes alternatifs et des repousses | X | | X | X |

Tableau 4.2-2. Différentes méthodes de lutte culturale contre quatre grands types d'ennemis des cultures (adapté de Bajwa et Kogan, 2004).

| Système de culture | Effet attendu sur la flore | | Exemples |
|--|---|---|--|
| | Réduction du nombre de plantes (levée/survie) | Augmentation de la compétitivité de la culture (baisse de la production semencière) | |
| Succession de cultures | X | | Alternance de cultures d'hiver et de printemps-été |
| Travail du sol (primaire) | X | | Profondeur de labour alternance labour - travail superficiel |
| Préparation du lit de semences | X | | Faux semis |
| Désherbage mécanique | X | | Post-levée (buttage, sarclage, binage...) |
| Culture intercalaire | X | | Couverture d'automne-hiver (engrais vert, CIPAN) |
| Couvert permanent | X | X | Culture associée, mulch vivant permanent |
| Désherbage thermique | X | | Pré-levée ou post-levée (localisé) |
| Mulching/Solarisation | X | | Films plastiques noirs ou transparents |
| Cultivar | | X | cultivars à forte vigueur initiale |
| Semis - repiquage - densité de semis - écartement entre rangs - date | X X | X X X | Forte densité Ecartement réduit Semis précoce ou tardif |
| Fertilisation | X | X | Forme et placement de l'engrais, Dose élevée ou non |
| Irrigation | X | X | Micro-irrigation ou non, Dose élevée ou non, Fréquence et date d'application |

Tableau 4.2-3. Éléments du système de culture permettant de contribuer au contrôle des mauvaises herbes.

La lutte culturale contre les adventices (Debaeke, 1997 ; Bond et Grundy, 2001 ; Barberi, 2002) consiste à limiter la constitution du stock semencier en contrôlant le retour au stock des semences (date de récolte, travail du sol) et la distribution verticale de ces semences (travail du sol). La réduction de la production semencière passe par une limitation des levées (travail du sol) et par l'augmentation de la compétitivité de la culture au détriment des adventices (densité de peuplement, fertilisation) (tableau 4.2-3). Le choix de la succession de cultures, de l'alternance ou non des profondeurs de travail du sol, enfin de la date de semis permettent de créer les conditions d'une esquivance, c'est-à-dire de limiter l'apparition des espèces les plus adaptées à un cycle cultural donné.

4.2.7. Les biotechnologies et le génie génétique

4.2.7.1. Remarques générales

Si l'on s'en tient à une vision restreinte consistant à seulement inventorier les actions qui sont directement destinées à contrôler les populations de bio-agresseurs, l'essentiel de la protection des cultures en France apparaîtrait fondée sur l'usage de pesticides. Une façon immédiate de réduire ce recours aux pesticides est d'utiliser d'autres manières également directes de contrôler et de réduire les populations de bio-agresseurs. Parmi celles-ci figurent l'insertion, dans le génome des plantes cultivées, de gènes hétérologues leur conférant une résistance complète à l'égard des bio-agresseurs. C'est un argument fort, et objectif en soi si l'on s'en tient à cette vision étroite, en faveur du déploiement de plantes cultivées transgéniques : si l'on utilise des variétés possédant des résistances complètes, transgéniques, contre différents bio-agresseurs, il n'est alors plus nécessaire d'employer des pesticides contre ces bio-agresseurs (Mohan Babu *et al.*, 2003).

Les méthodes mises en œuvre par le génie génétique diffèrent sur trois points essentiels de celles utilisées en amélioration variétale. Ces différences de méthode influencent le produit de la recherche, et son objectif final. Ces différences peuvent être énumérées ainsi :

- 1- les gènes de résistance introduits ne proviennent pas du pool génétique de l'espèce cultivée considérée ;
- 2- la méthode privilégiée est d'emblée censée conférer une résistance complète vis-à-vis d'un bio-agresseur (ou d'un groupe de bio-agresseurs) donnés ;
- 3- le produit de la transformation génétique réussie, c'est-à-dire, une variété totalement résistante à un bio-agresseur donné, ne porte dans son matériel génétique que le ou les gènes permettant l'expression de la résistance considérée.

D'autres objectifs sont également associés au déploiement de cultures transgéniques, dont l'utilisation plus efficace, ou plus simple, de pesticides ; c'est le cas des résistances aux herbicides. Il convient de noter qu'il s'agit là d'un objectif de court terme (voir ci-dessous).

Nous donnons ci-dessous des éléments de réflexion, émanant du CABI (Commonwealth Agricultural Bureau International), de l'APS (American Phytopathological Society), et du Centre Recherche de la Commission Européenne.

Plusieurs éléments factuels paraissent importants à souligner sur ce thème :

- 1- Les surfaces cultivées avec des plantes transgéniques se sont fortement développées dans le monde, et se développent encore (figures 4.2-2, 4.2-3, 4.2-4). Ces plantes transgéniques ne sont pas toutes porteuses de transformations concernant la protection des plantes. Cette expansion est néanmoins en soi la preuve matérielle que ces technologies sont susceptibles de délivrer des résultats utilisables par l'agriculture.
- 2- Certaines de ces innovations biotechnologiques ont accru significativement la compétitivité de productions agricoles sur le marché international, notamment dans les économies émergentes, malgré les oppositions qu'elles ont rencontrées et qu'elles rencontrent encore.

3- L'avis de la Société Américaine de Phytopathologie reflète à la fois la prudence que doit susciter toute innovation scientifique, et la nécessité pour la science de ne pas ignorer un front de progrès des connaissances.

4- Les résultats obtenus dans ce domaine sont de deux types, très différents ; les uns concernent un emploi indirect des gènes transférés ou manipulés, par exemple lorsqu'ils permettent l'emploi d'un herbicide sur un transgène résistant, et les autres concernent des une expression directe de ces gènes à l'encontre de certains bio-agresseurs. Dans ce second cas, l'approche équivaut, en termes de biologie des populations, au déploiement de gènes de résistance complets sur de grandes surfaces, avec les risques que l'on connaît.

5- Des recherches récentes portent sur la transmission à des plantes cultivées de résistances à l'encontre de pathogènes vis-à-vis desquels il n'existe pas de sources de résistance naturelles (cas de *Rhizoctonia solani* sur riz). Dans ce cas, les gènes transférés sont de telle nature qu'ils ne sont pas susceptibles d'être contournés (gènes de chitinases, par exemple).

6- Hormis les questions d'ordre éthique, politiques et culturelles, il existe des difficultés quant au développement des biotechnologies et quant à l'utilisation du génie génétique. Ces difficultés ont pour origine (i) les méthodes actuellement disponibles, (ii) la nature des acteurs (institutions publiques nationales, privées, ou publiques internationales) des recherches en biotechnologie végétale, et (iii) les contextes économiques où ces innovations peuvent être déployées, ou non. En particulier :

- les progrès ont jusqu'ici principalement concerné des agricultures commerciales, à grande échelle ; à l'inverse, les productions de petite échelle, ou n'entrant pas dans des circuits commerciaux significatifs, ont été laissés à l'écart ;
- la durabilité des méthodes de protection suscite des interrogations ; à bien des égards, cet aspect a été sous-évalué ; la notion de durabilité dépend cependant des types de résistances envisagées (voir les remarques ci-dessus). L'émergence rapide de résistances d'insectes aux toxines de *B. thurengiensis*, par exemple, produites par des transgènes illustre cette préoccupation (Raman *et altman*, 1994 ; Laxminarayan et Simpson, 2002) ;
- l'emploi de certaines biotechnologies est susceptible de fragiliser (ressources génétiques) ou de marginaliser (dépendance technologique et/ou économique) les agricultures fragiles, notamment dans les pays du Sud, mais aussi les agricultures non conventionnelles du Nord ;
- une autre préoccupation concerne le développement de résistances à certains herbicides chez des variétés de plantes cultivées alimentaires et majeures. Le déploiement de telles variétés peuvent accroître la dépendance des agriculteurs vis-à-vis des herbicides.

Le Centre de Recherche de la Commission Européenne, dans un rapport récent (Lheureux *et al.* 2003) souligne un certain nombre de points:

- trois groupes d'innovations sont envisagés par la recherche-développement en Europe, selon les horizons de résultats : à échéance de 2007, à échéance de 2011, à échéance dépassant 2011 ; ces trois groupes correspondent à des objectifs progressivement diversifiés;
- dans le premier groupe (horizon de 5 ans) figurent des objectifs destinés à réduire les besoins en intrants pesticides sur des cultures sensibles ou vulnérables : résistances aux herbicides (maïs, colza, betterave à sucre, betterave fourragère, coton, chicorée), résistances aux insectes (maïs, coton, pomme de terre), et combinaisons de ces deux types de traits (maïs et coton) ;
- dans le second groupe (horizon de 5-10 ans) figurent des objectifs destinés à réduire, voire faire disparaître, l'usage de pesticides en agriculture pour certaines production : résistances à des pathogènes fongiques (blé, colza, tournesol, fruitiers) ; résistances à des virus (betterave à sucre, pomme de terre, tomate, melon, fruitiers) ; ainsi que d'autres résistances à des herbicides (blé, orge, riz) ;
- dans le troisième groupe (horizon dépassant 10 ans) figurent des objectifs beaucoup plus divers, qui ne concernent plus la protection des cultures ;
- ce rapport mentionne que, de 1998 à 2003, le nombre d'essais de cultures génétiquement modifiées a chuté de 76% ;
- également, ce rapport indique que le ralentissement de la recherche-développement dans ce domaine ne peut pas ne pas avoir d'effets sur l'innovation : de fait, l'enquête menée dans le cadre de ce rapport fait mention de très peu de nouvelles applications innovantes faisant l'objet de recherches dans ce domaine en Europe.

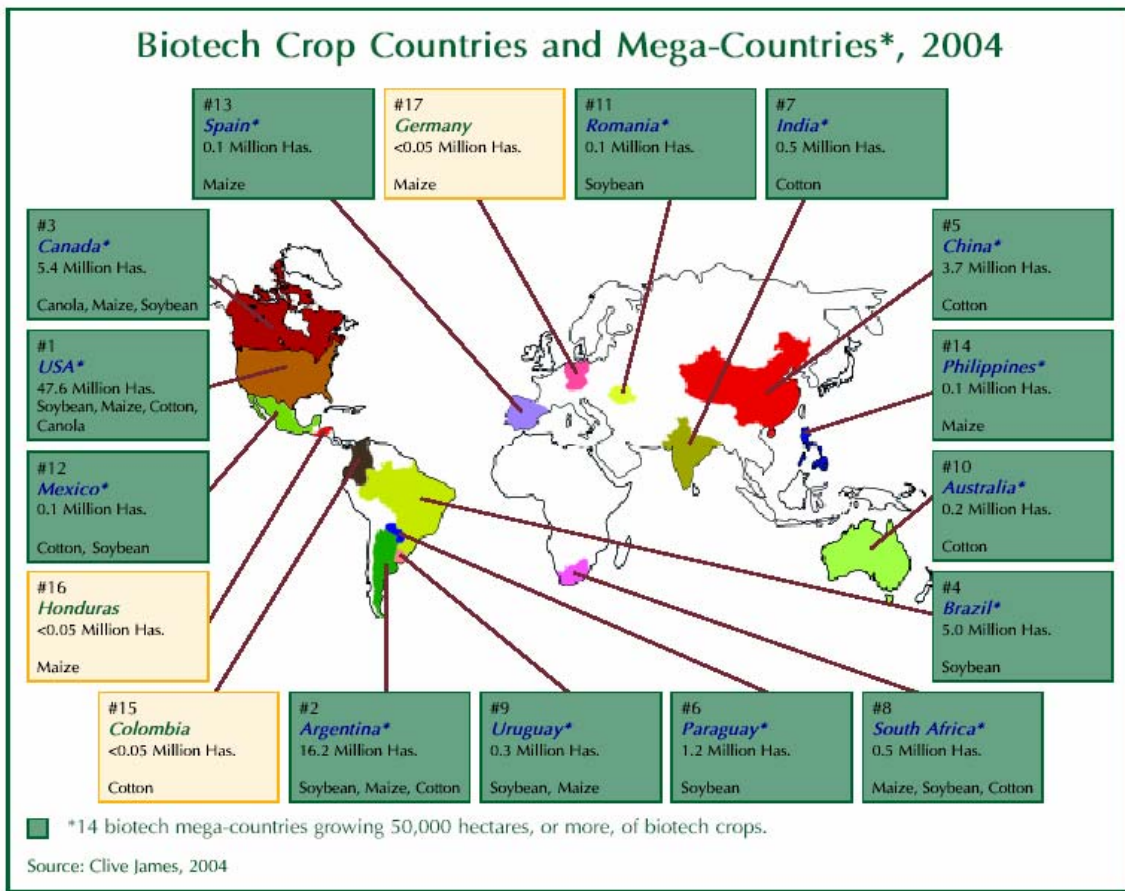
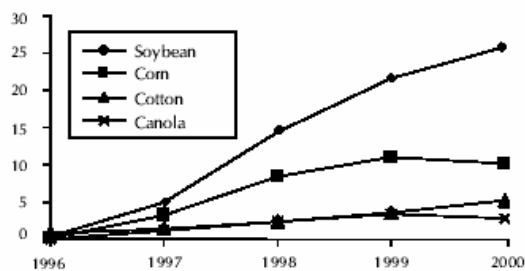


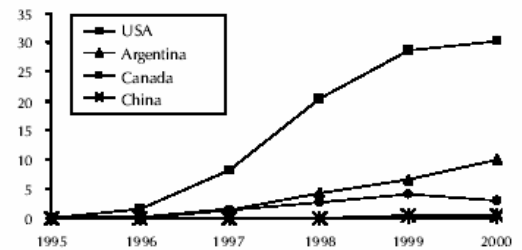
Figure 4.2-2. Répartition mondiale des cultures d'OGM (source : International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications ; <http://www.isaaa.org/>).

Figure 4. Global Area of Transgenic Crops, 1996 to 2000: by Crop (million hectares)



Source: Clive James, 2000.

Figure 3. Global Area of Transgenic Crops, 1996 to 2000: by Country (million hectares)



Source: Clive James, 2000.

Figure 4.2-3. Evolution des surfaces cultivées en OGM dans le monde de 1996 à 2000 par culture (source : International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications ; <http://www.isaaa.org/>).

Figure 4.2-4. Evolution des surfaces cultivées en OGM dans le monde de 1996 à 2000 par pays (source : International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications ; <http://www.isaaa.org/>).

4.2.7.2. Biotechnologies et protection des plantes

Source : Crop Protection Compendium, 2002 Edition, CABInternational, Wallingford, Oxon OX10 8DE, UK ; www.cabicompendium.org/cpc)

Un champ entier de recherches s'est ouvert avec le développement des technologies moléculaires. Initialement, les biotechnologies étaient étroitement définies comme étant 'l'utilisation intégrée de la biologie moléculaire, de la génétique moléculaire, de la microbiologie (biologie cellulaire) et des technologies de processus, avec l'objectif de parvenir à des applications pratiques matérialisées par des micro-organismes, des cultures de cellules, ou des fragments d'organismes ou de cellules'. Cette définition se focalisait sur les applications industrielles, telles que les processus de fermentation des fromages, la production d'antibiotiques par des champignons, et le traitement des eaux usagées par des bactéries.

Aujourd'hui, une définition plus large est adoptée, qui recouvre les applications de la biologie moléculaire pour l'agriculture, l'environnement, et pour la santé. Cette acceptation plus large met l'accent sur l'amélioration des caractéristiques génétiques des cellules (végétales, animales, bactériennes ou fongiques) en exploitant un ensemble de technologies moléculaires pour élaborer des méthodes améliorées et des organismes modifiés.

La recherche en biotechnologie est très fréquemment considérée par ses acteurs comme un composant de la recherche pour la protection intégrée des cultures, avec pour but l'élaboration de nouvelles méthodes de contrôle. Des plantes transgéniques résistantes à des herbicides, à des insectes, et à des virus ont ainsi été produites. Certains transgènes sont aujourd'hui disponibles pour des croisements avec des variétés cultivées existantes.

Sont listées ci-dessous quelques applications pratiques envisagées, envisageables, ou utilisées, des biotechnologies en protection des plantes.

- des anticorps monoclonaux sont utilisés pour des tests sur semences, des matériels végétaux de plantation, des greffons et des porte-greffe, pour détecter des virus et des bactéries ;
- la régénération *in vitro* exploite le potentiel qu'a chaque cellule végétale de régénérer un individu entier. Les tissus méristématiques indemnes de virus sont utilisés en cultures *in vitro* pour produire des vitroplants sains. Cette technique est également utilisée pour produire des plantes transgéniques ;
- une plante résistance aux herbicides est une plante dans laquelle la résistance a été incorporée par transfert de gène grâce à une bactérie qui a acquis cette résistance. Habituellement, c'est *Agrobacterium tumefaciens* qui est utilisé pour ces transferts ;
- des plantes résistantes aux virus peuvent être obtenues par incorporation dans les plantes de gènes de protéines capsidaires ; six maladies virales importantes ont vu ces avancées, dont le tobamovirus de la mosaïque du tabac et le potexvirus X de la pomme de terre. Plusieurs transgènes (tabac, pomme de terre et tomate) résistants ont été obtenus ;
- des transgènes possédant une résistance aux insectes peuvent être obtenus en transférant un gène insecticide provenant de *Bacillus thuringiensis*. Les plantes transgéniques produisent une protéine toxique par ingestion par des chenilles ;
- les bactéries de la rhizosphère (*Pseudomonas* spp.) peuvent servir de vecteurs de gènes produisant des toxines permettant de protéger l'appareil racinaire contre des attaques d'insectes ;
- des manipulations génétiques sur des baculovirus pathogènes d'insectes peuvent les rendre de meilleurs agents de contrôle. Les baculovirus peuvent également être manipulés afin qu'ils produisent des protéines utilisables à fins thérapeutiques, de diagnostic, et prophylactiques.

Un ensemble de projets de recherches sont menés, qui concernent :

- l'analyse de la biologie moléculaire de gènes clés contrôlant le développement et la reproduction des insectes ;
- l'étude d'insecticides biologiques actuels afin de résoudre des problèmes concernant leur production et leur efficacité ;
- les relations gène-pour-gène mises en œuvre dans les interactions plantes-pathogènes.

4.2.7.3. Position de la Société Américaine de Phytopathologie vis-à-vis des biotechnologies

La Société Américaine de Phytopathologie a donné une opinion écrite, approuvée par son comité de direction :

The American Phytopathological Society's (APS) governing Council approved on August 29, 2001 a statement expressing its position on biotechnology. The APS Public Policy Board recommended an initial draft of this statement to Council. The approved statement acknowledges the many benefits of using biotechnology for plant pathogen and plant research and for disease management. It also expresses support for responsible and science-based oversight and regulation of biotechnology. Further, it calls for placing consideration of risks associated with managing plant diseases through biotechnology in perspective with other disease management approaches, including social, economic, and environmental issues and concerns.

L'entièreté de ce texte est consultable à l'adresse suivante :

<http://www.apsnet.org/media/ps/APS%20Biotech%20Statement.pdf>

4.2.7.4. La mise en culture de plantes génétiquement modifiées permet-elle une réduction de l'utilisation des pesticides ?

L'utilisation de plantes génétiquement modifiées en agriculture fait donc débat. Des arguments très divers sont avancés par les tenants de l'utilisation de variétés génétiquement modifiées et leurs opposants. Dans le cadre de cette expertise, nous n'évoquerons ici que la question de l'impact que pourraient avoir ces cultures sur l'utilisation de pesticides.

Le caractère passionné du débat sur les OGM ne rend pas aisée une analyse objective de la littérature pour beaucoup constituée de rapports, parfois d'articles dans des revues scientifiques, mais avec un statut qui va du "point de vue" à l'article revu et accepté par les pairs. L'analyse ci-dessous fera appel à ces trois types d'articles, les rapports principalement utilisés étant originaires de l'"Economic Research Service" de l'United State Department of Agriculture. Les données dont nous disposons aujourd'hui concernent donc essentiellement les Etats-Unis d'Amérique, fortement engagés dans l'utilisation de plantes OGM depuis 1996.

Les cultures sur lesquelles portent ces études sont d'une part, le soja, le coton et le maïs exprimant un gène de tolérance à un herbicide total, le glyphosate, et d'autre part, le coton et le maïs exprimant le gène Bt de résistance à certains insectes (noctuelles).

En 1997, alors que 17% des surfaces de soja et 25% des surfaces de coton étaient cultivés en OGM aux USA, une enquête de l'USDA (McBride and Books, 2000) indique que l'utilisation de soja tolérant aux herbicides entraîne une réduction des coûts d'utilisation de pesticides de 10 \$ par acre⁵, correspondant à un traitement en moins, en moyenne. Ce rapport signale également que la mise en culture de plantes OGM se traduit par une plus grande proportion de traitements en post-émergence et un abandon de certaines pratiques culturales ayant pour objectif principal la destruction mécanique des mauvaises herbes. Le bilan économique de ces cultures reste équivalent dans les deux systèmes, le coût plus élevé des semences transgéniques compensant les gains liés au moindre coût des pesticides et autres pratiques. En ce qui concerne le coton tolérant au glyphosate, les mêmes tendances sont observées avec une augmentation du travail simplifié du sol et une équivalence des performances économiques à l'exception d'une région (Delta Region) où le rendement est inférieur pour les cultures génétiquement modifiées, comparé aux cultures traditionnelles. Dans cette même région, le nombre d'applications d'herbicide était réduit de 5 à 2, alors qu'il est équivalent pour les deux systèmes de culture dans l'autre région enquêtée (Southeast Region). Les résultats concernant le coton Bt indiquent une réduction du nombre de traitement de 1,2 en moyenne si l'on considère les traitements destinés à contrôler les mêmes insectes que ceux visés par l'utilisation de plantes Bt (Southeast Region). Dans l'autre région enquêtée (Delta Region), le nombre de traitements dirigés contre les insectes visés par le gène Bt passe de 1,86 en culture traditionnelle à 0,45 en culture génétiquement modifiée (soit une

⁵ Acre = 0,405 hectares

diminution d'environ 1,4 traitement par hectare). Dans cette région, par contre davantage de traitements pesticides sont réalisés vis-à-vis d'autres insectes amenant le nombre total d'applications d'insecticides par hectare de 5,38 pour le coton Bt à 4,11 pour le coton traditionnel.

Le Service de Recherche en Economie de l'USDA publie une autre étude en 2000, basée sur les surfaces cultivées en OGM aux USA pour l'année 1999, soit 49% des surfaces des 3 principales cultures citées ci-dessus (Heimlich *et al.*, 2000). Elle reprend également des données de 1997 et 1998 et utilise des modèles économétriques pour prendre en compte des facteurs autres que l'adoption des plantes transgéniques qui pourraient affecter l'utilisation de pesticides.

Une première analyse procède de comparaisons au sein d'une même année. Alors que le nombre de traitement-hectares⁶ était réduit de 2,5% en 1997 par l'adoption d'OGM, il l'est de 4,4% en 1998, les cultures de soja y apportant la plus grosse contribution. Par contre l'analyse en quantités de matières actives appliquées ne révèle que des différences minimales entre modes de production (-0,1% en 1997 ; -0,05% en 1998 lorsque les cultures de plantes génétiquement modifiées sont adoptées).

Un autre mode de calcul consiste à comparer l'évolution de la consommation de pesticides entre deux années. Ainsi, alors qu'entre 1997 et 1998, le nombre de traitement-hectares augmente de 19,8 millions pour les cultures OGM et qu'il chute de 23,5 millions pour les autres, les auteurs de ce rapport observent une réduction de matière active utilisée entre ces deux années de $3,7 \cdot 10^6$ kg soit une réduction de 3,5% (différence entre $17,8 \cdot 10^6$ kg en plus pour les cultures OGM, $21,5 \cdot 10^6$ kg en moins pour les non OGM).

Afin de tenir compte de la spécificité des années analysées (particularité climatique, importance des bio-agresseurs...) les chiffres corrigés par l'utilisation d'un modèle succinctement décrit dans l'article, donnent, pour le maïs, le soja et le coton transgéniques une diminution de l'utilisation de pesticides de $1,14 \cdot 10^6$ kg entre 1997 et 1998, soit 1%.

D'autres données, recensées par l'USDA sont aujourd'hui disponibles pour la période 1996-2004 et devraient permettre une analyse plus rigoureuse de l'impact de la mise en culture d'OGM sur l'utilisation de pesticides. Malheureusement, la déclinaison entre cultures génétiquement modifiées et cultures traditionnelles n'est pas réalisée chaque année pour chaque culture. Ainsi pour le soja tolérant au glyphosate, seules les années 1997, 1998 et 2002 permettent une analyse entre ces deux types de culture (Bonny et Sausse, 2004). Les seules analyses que nous ayons pu identifier proviennent d'un cabinet de consultance le Northwest Science and Environmental Policy Center, dans l'Idaho, dirigé par Charles M. Benbrook. Celui-ci publie un "point de vue" dans la revue Pesticide Outlook en 2001 où reprenant les chiffres de l'USDA il conclut à une grande diversité entre situations et, en moyenne à une non réduction voire légère augmentation de l'utilisation d'herbicides suite à l'utilisation de variétés tolérantes au glyphosate. En ce qui concerne les plantes génétiquement modifiées utilisant le gène Bt, si cette technologie a peu modifié les quantités d'insecticide utilisées pour le maïs, elle a permis dans certaines régions des Etats Unis de réduire très significativement les programmes de traitements visant le complexe d'espèces sur lequel est efficace le gène Bt. En Arizona, il a ainsi été observé une réduction de la quantité d'insecticides utilisée contre les insectes visés par le gène Bt de 181 000 kg en 1995 à 907 kg en 2000, essentiellement attribuables à l'augmentation des surfaces en maïs Bt dans cet Etat (Benbrook, 2001). L'auteur signale également que les insecticides ainsi remplacés sont des insecticides particulièrement toxiques comme les organophosphorés. Une évolution similaire est observée au Mississippi. Alors qu'on enregistrait plus de 8 traitement-hectares de 1990 à 1995 dans cet Etat, avec 40% d'organophosphorés une réduction de 9,4 traitement-hectares en 1995 à 0,6 en 2000 a été observée (et une réduction de 3,1 kg d'insecticides appliqués à 0,22 kg par hectare). Dans le même temps, en Alabama où 62% des surfaces sont plantées en maïs Bt, les applications d'insecticides pour lutter contre les insectes visés par le gène Bt ont presque doublé entre 1997 et 2000 sans que ne soit évoquée une hypothèse d'explication (Benbrook, 2001). En Chine, des réductions importantes d'utilisation de pesticides sont observées, puisqu'en expérimentations de pré-productions de coton Bt, les quantités utilisées passent en moyenne de 21,2 kg / ha à 2,0 kg / ha en cas d'adoption des cultures transgéniques (données recueillies sur respectivement 224 et 123 parcelles cultivées en 2002-2003) (Huang *et al.*, 2005).

⁶ Il s'agit du produit du nombre d'hectares traités par le nombre de traitements réalisés

Dans une revue non publiée mais disponible sur le site internet du Northwest Science and Environmental Policy Center⁷, Benbrook (2004) reprend les statistiques de l'USDA et fait une analyse du résultat de 9 années de mise en culture de plantes OGM aux Etats Unis (tolérance au glyphosate et résistance Bt). Il conclut que si une légère diminution de l'utilisation de pesticides a pu être observée aux débuts de années de mise en place de ces cultures, cela n'est plus vrai depuis 1999. Il avance ainsi les chiffres suivants : *"Les maïs, soja et coton génétiquement modifiés ont entraîné une augmentation d'utilisation de pesticides de 55,5.10⁶ kg depuis 1996. Alors que les cultures "Bt" permettaient une réduction de l'utilisation d'insecticides d'environ 7,1.10⁶ kg sur cette période, les cultures tolérantes aux herbicides enregistraient une augmentation de 55,5.10⁶ kg. Les cultures "Bt" ont permis une réduction de l'utilisation d'insecticides de 5% sur coton et maïs, alors que dans le même temps les quantités d'herbicides utilisées sur maïs, coton et soja augmentaient elles aussi de 5%. Mais comme les quantités d'herbicides utilisées sur maïs, coton et soja sont largement supérieures aux quantités d'insecticides utilisés sur coton et maïs, la consommation de l'ensemble de ces pesticides a augmenté de 4,1% entre 1996 et 2004."* (Benbrook, 2004).

D'autres sites peuvent être consultés sur Internet, donnant des conclusions différentes tout en faisant référence aux mêmes données de base, comme le signalent Bonny et Sausse (2004) dans leur analyse du soja tolérant au glyphosate. Reprenant les conclusions d'une analyse antérieure de Benbrook (2003), ils en énoncent les limites, des estimations et des extrapolations étant nécessaires pour pallier le manque de précision des données disponibles. Il ressort de ces différents éléments que la question de l'intérêt des OGM pour réduire l'utilisation de pesticides nécessite une analyse au cas par cas.

Dans un rapport technique publié en 2002 et introduisant des données allant jusqu'à 2000, Fernandez-Cornero et McBride (Economic Research Service/USDA) soulignent l'importance des variables à prendre en compte en fonction des objectifs recherchés. Ils estiment ainsi que la réduction de 6,2% en traitement-hectares observée pour l'ensemble des pesticides sur coton, soja et maïs est attribuable pour 80% à la réduction du nombre de traitements herbicides sur soja. L'analyse des quantités de matières actives utilisées sur coton, maïs et soja, révèle également une diminution de 1,1 millions de kg, alors que les quantités totales de matières actives d'herbicides utilisées sur soja augmentent, 6,1.10⁶ kg de glyphosate étant utilisées en remplacement de 5,0.10⁶ kg d'autres herbicides (Fernandez-Cornero et McBride, 2002). Ce même rapport évoque également l'évolution des pratiques liées à l'utilisation de plantes génétiquement modifiées. Dans le cas d'utilisation de variétés tolérantes aux herbicides trois tendances sont observées : une utilisation accrue d'un seul type d'herbicide (le glyphosate), la simplification du travail du sol et l'abandon de pratiques culturales visant à réduire mécaniquement l'importance des mauvaises herbes, le remplacement de traitements en pré-émergence par des traitements post-émergence (Wolfenbarger et Phifer, 2000). Cette évolution de pratiques peut avoir des effets sur l'évolution des communautés de mauvaises herbes. Certains cas de résistance ou de déplacements de flore ont déjà été observés (Owen et Zelaya, 2005) et interrogent quant à la durabilité de méthodes basées sur la tolérance des plantes cultivées aux herbicides. D'autres travaux montrent qu'une destruction tardive de mauvaises herbes avec les traitements de post-émergence permise sur betteraves tolérantes au glyphosate conduit à une infestation accrue de pucerons (Dewar *et al.*, 2000). Sur colza tolérant au glyphosate, Bowan *et al.* (2005) observent une réduction des populations de dicotylédones et une augmentation des populations de monocotylédones, en comparaison avec des cultures de colza traditionnelles. Ils montrent également des diminutions significatives des populations d'abeilles et de papillons en cultures de colza tolérant au glyphosate, alors que les populations de collemboles sont plus importantes.

Plus généralement, beaucoup d'auteurs s'interrogent sur la pertinence du lien "plantes génétiquement modifiées – réduction de l'utilisation de pesticides" dans le cas de variétés "construites" pour être tolérantes à un herbicide (Bonny et Sausse, 2004). Dans le cas des plantes exprimant le gène Bt, d'autres auteurs s'interrogent sur la stratégie consistant à "mimer" le mode d'action d'un pesticide, c'est à dire privilégiant un mode d'action unique et fort pour détruire un bio-agresseur (Welsh *et al.*, 2002). Contestant ce qu'ils appellent le "paradigme du pesticide", ils appellent à une utilisation des biotechnologies centrée sur les traits qui permettent de rendre les cultures plus tolérantes face aux

⁷ http://www.biotech-info.net/Full_version_first_nine.pdf

agressions parasitaires et mieux adaptées aux agro-écosystèmes dans lesquels elles doivent s'intégrer durablement. Dans une revue plus complète analysant les risques environnementaux et les limites des politiques actuelles de régulation de l'utilisation des plantes génétiquement modifiées, Ervin *et al.* (2003) reprennent cette argumentation de la nécessité d'une prise en compte de caractères différents de ceux actuellement privilégiés par les grandes firmes de la biotechnologie, avec un choix davantage fondé sur des concepts d'écologie et de biologie évolutive.

4.2.8. Induction de résistance chez les plantes

Dans leur environnement, les plantes sont fréquemment soumises à des stress biotiques ou abiotiques. Pour y faire face, elles ont développé des mécanismes adaptatifs permettant d'orienter leur métabolisme. Dans le cas d'une interaction entre un bio-agresseur et une plante, une succession ou cascade d'événements commence avec la reconnaissance des deux partenaires, suivie de la transduction de signaux émis à l'interface et qui vont conditionner la réponse finale, à savoir la mise en place de réactions de défense. Ces réactions de défense peuvent être de plusieurs ordres : épaissement des structures pariétales renforçant leur rôle de barrière physique, stimulation de voies métaboliques secondaires permettant la synthèse de substances antimicrobiennes (comme les phytoalexines) ou de composés impliqués dans la signalisation de l'agression vers d'autres cellules, voire à l'ensemble de la plante par systémie (acide salicylique, éthylène, acide jasmonique...). Enfin, l'accumulation de protéines de défense (ou protéines PR pour "Pathogenesis Related") est associée à la réponse des plantes aux attaques des bio-agresseurs. Ces protéines inhibent certains facteurs du pouvoir pathogène des microorganismes (protéases, polygalacturonases) voire attaquent certaines de leurs structures vitales (structures pariétales et membranes plasmiques) (Klarzynski et Fritig, 2001).

Ces mécanismes ont été beaucoup étudiés pour mieux comprendre les étapes qui conduisent à la réaction incompatible entre un agent pathogène et une plante hôte résistante, (Dangl et Jones, 2001), mais ils sont également mis en place dans le cas de réactions compatibles qui se traduisent par l'expression de la maladie. Dans ce dernier cas, l'objectif appliqué est de renforcer ou stimuler la capacité, ainsi prise en défaut, de la plante à se protéger.

L'induction de résistance d'une plante consiste donc à activer des mécanismes de défense naturelle présents dans la plante mais qui sont à l'état latent. Bien que rapportés de longue date (Chester, 1933) ces phénomènes d'induction de résistance ont connu un regain d'intérêt à la suite des travaux de Kuć (1995, 2001). Ils représentent encore aujourd'hui un champ de recherche important (Hammerschmidt *et al.*, 2001).

Une des premières applications de ces recherches fut le développement d'un analogue de l'acide salicylique, l'acibenzolar-S-méthyl, commercialisé sous le nom de BION[®] en Europe et homologué vis-à-vis de l'oïdium du blé et du mildiou du tabac, d'ACTIGARD[®] aux USA pour lutter contre la rouille blanche de l'épinard, divers mildious de crucifères et une maladie bactérienne de la tomate. Ce produit n'a aucune activité antimicrobienne *in vitro* et active, chez les plantes, des réactions de défense vis-à-vis d'agents pathogènes aussi différents que l'oïdium du blé, le virus de la mosaïque du concombre (CMV), le virus Y de la pomme de terre (PVY), ou le feu bactérien sur pommier (Oostendorp *et al.*, 2001). Le produit seul doit être appliqué de façon préventive, n'ayant aucune efficacité sur des infections d'oïdium du blé déjà établies par exemple. Le niveau de protection assuré est partiel et les meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'acibenzolar-S-méthyl est associé à un fongicide, utilisé alors à faible dose, comme c'est le cas pour BION MX[®], en France, qui est une association de mfenoxam et d'acibenzolar-S-méthyl utilisable contre le mildiou du tabac. D'autres produits sont connus pour leur propriété inductrice de réactions de défense chez les plantes, comme le probenazole utilisé depuis 1975 en riziculture au Japon pour lutter contre la pyriculariose (Watanabe, 1977). L'acide β -Amino butyrique (ou BABA) est également reconnu comme jouant un rôle dans l'activation de réactions de défense chez les plantes mais semble-t-il sans mobiliser les voies connues de l'acide salicylique, de l'acide jasmonique ou de l'éthylène (Oostendorp *et al.*, 2001). Des substances naturelles extraites d'algues marines comme la laminarine ont également la capacité d'induire des réactions de défense non spécifiques chez les plantes. Ce produit a obtenu une autorisation de mise sur le marché provisoire en France (Iodus 40[®]) pour une utilisation vis-à-vis de

diverses maladies aériennes sur blé. Il est utilisé seul, sans association avec un fongicide, pour un traitement qui doit être réalisé de façon préventive par rapport aux attaques parasitaires (Klarzynski et Fritig, 2001).

Malgré l'importance des recherches conduites sur ces phénomènes, les applications restent donc aujourd'hui limitées quant au nombre de produits mis sur le marché. De même, l'efficacité obtenue avec ces molécules est souvent partielle et doit être associée à un fongicide soit en mélange, soit en traitement complémentaire. Des progrès peuvent être espérés d'un approfondissement des connaissances sur les cascades de signaux et les molécules impliquées ou sur une meilleure identification des éliciteurs et récepteurs à l'initiation de ces réactions de défense. Quoiqu'il en soit, si l'efficacité reste partielle, la question des conditions d'utilisation de ces molécules restera posée : dans quels systèmes de culture donneront-elles la meilleure efficacité. Devront-elles être toujours associées à des fongicides ? Est-il possible d'avoir une efficacité complémentaire entre une induction de défense naturelle et une résistance génétique partielle de la plante traitée ? Sur ce dernier point, il semblerait que non selon Tuzun (2001) qui considère que ce sont les mêmes mécanismes et molécules qui sont impliqués dans la résistance induite et dans la résistance partielle multigénique (résistance horizontale). Mais cette hypothèse dressée à partir d'un cas particulier d'étude mérite confirmation. Enfin, certains auteurs posent la question du coût physiologique pour la plante à mobiliser ainsi une partie de son métabolisme, d'autant que la plante répond à une variété de signaux qu'ils soient abiotiques (froid, sécheresse...) ou biotiques (agents pathogènes, insectes...). Il a ainsi pu être démontré qu'il existait une interaction, avec des compromis (*trade-off*) variables en fonction des agents inducteurs, entre induction via l'acide jasmonique dans le cas d'une attaque de plantes par insectes et induction via l'acide salicylique à la suite d'attaque par un agent pathogène. Ces compromis ont bien évidemment des répercussions sur le niveau de protection obtenu vis-à-vis de ces bio-agresseurs (Bostock *et al.*, 2001) et pourraient expliquer la variabilité des résultats obtenus au champ lorsque les plantes sont soumises à des agressions diverses. On peut donc penser que si les recherches menées actuellement sur l'induction de défense des plantes sont prometteuses, elles mériteraient d'être aussi spécifiquement orientées, à partir des mécanismes et molécules aujourd'hui connus, vers une meilleure connaissance des conditions de leur mise en œuvre comme composantes de stratégies de gestion des cultures.

4.2.9. L'intégration en protection des cultures

4.2.9.1. IPM - Quelques définitions

De nombreuses définitions de IPM, Integrated Pest Management, peuvent être trouvées sur le site: www.ippc.orst.edu/IPMdefinition/home.html. Nous donnons ci-dessous quelques-unes des définitions liées au domaine dans leurs versions originales.

IPM is defined as a pest management system that, in the context of the associated environment and the population dynamics of the pest species, utilizes all suitable techniques in as compatible a manner as possible, and maintains the pest populations at levels below those causing economic injury. In its restricted sense, it refers to the management of single pest species on specific crops or in particular places. In a more general sense, it applies to the coordinated management of all pest populations in the agricultural or forest environment. It is not only the juxtaposition or superimposition of two control techniques [...] but the integration of all suitable management techniques with the natural regulating and limiting elements of the environment.
(FAO, 1968)⁸

Integrated crop management embraces systems of plant production most appropriate to the respective location and environment, in which, in consideration of economic and environmental requirements, all suitable procedures of agronomy, plant nutrition and plant protection are employed as harmoniously

⁸ Cité par : Chiarappa, L. (Ed.) 1971. Crop Loss Assessment Methods. FAO Manual on Evaluation and Prevention of Losses by Pests, Diseases, and Weeds. Comm. Agric. Bureaux, Farnham, England. Loose-leafed.

as possible with each other utilizing biological-technical progress as well as natural regulatory factors of noxious organisms in order to guarantee long-term assured yields and economic success.
(Heitefuss, 1989)

Chemical control of agricultural pests has dominated the scene, but its overuse has adverse effects on farm budgets, human health and the environment, as well as on international trade. New pest problems continue to develop. Integrated pest management, which combines biological control, host plant resistance and appropriate farming practices, and minimizes the use of pesticides, is the best option for the future, as it guarantees yields, reduces costs, is environmentally friendly and contributes to the sustainability of agriculture.

Agenda 21 UNCED

L'ouvrage 'Simulation and Systems Management in Crop Protection' (Rabbinge *et al.*, 1989) fournit une base conceptuelle et méthodologique pour définir, analyser et modéliser différents composants impliqués dans cette problématique. La revue de bibliographie de Kogan (1998) donne, sous un angle entomologique, une analyse historique des méthodes, des concepts, et des résultats en protection intégrée. Une revue plus récente est donnée par McRoberts *et al* (2003).

4.2.9.2. Questions relatives à l'intégration en protection des cultures

Trop de débats ont obscurci les objectifs réels d'une protection des cultures à la fois pratique, utilisable, et moderne, car ils se focalisent sur le terme 'intégré'. La question n'est pas ici de savoir si une stratégie de gestion des bio-agresseurs est 'intégrée' parce que, par exemple, elle incorporerait des éléments de lutte biologique, ou pas. Sans avoir l'ambition de répondre complètement, nous préférons ici poser quelques questions simples et donner des pistes de réponse :

- 1- les méthodes actuellement utilisées sont-elles intégrées ?
- 2- pourquoi intégrer ces méthodes dans des stratégies plus raffinées ?
- 3- comment construire ces stratégies de lutte ?

Question 1. Les méthodes actuellement utilisées sont-elles intégrées ?

De fait, les méthodes actuellement utilisées sont, par nécessité, intégrées - mais elles sont intégrées par les agriculteurs dans leurs itinéraires techniques : la protection des cultures n'est qu'une des facettes de la production végétale. En réalité, c'est précisément pour cela que la notion d'Integrated Crop Management a été adoptée par beaucoup de scientifiques impliqués dans la recherche pour la protection des cultures dans le monde : il est illusoire de mener une recherche ou de développer une technologie déconnectée de son contexte d'utilisation. Les paragraphes précédents ont montré que, souvent, les profils de bio-agresseurs, les dégâts, les dommages, et les pertes qu'ils occasionnent sont dans une large mesure le reflet des pratiques mises en œuvre. Si l'on choisit un génotype sensible pour mettre en place un peuplement végétal, il est peu surprenant qu'un bio-agresseur s'y développe.

Naturellement, la question 1 fait d'abord référence à la combinaison effective d'instruments de contrôle spécifiés, choisis pour leur rôle à l'encontre de bio-agresseurs identifiés. La réponse varie alors d'un type de bio-agresseur, et d'un type de production à un autre. Certainement, le contrôle des adventices en grande culture fait souvent appel à un ensemble de méthodes combinées : travail du sol, dates de semis, mode de mise en place, désherbage chimique, par exemple. Mais, à l'opposé, le contrôle de la jaunisse nanisante sur blé (JNO) ne fait essentiellement appel qu'à des traitements insecticides préventifs. Ces traitements concernent généralement (i) des semis précoces pour des rendements accessibles élevés, (ii) des variétés sensibles, (iii) dans des paysages où souvent peu d'ennemis naturels sont présent en nombres efficaces, (iv) dans des régions où les sources d'inoculum, spécialement les repousses infectées, sont nombreuses. La création d'outils d'aide à la décision pour appliquer ces insecticides ne change pas le fait que, si des dates de semis plus tardives (et donc un rendement accessible plus faible) étaient choisies, peut-être accompagnées par des résistances même incomplètes, une synchronie de mise en place à l'échelle du paysage, et un soin particulier pour éliminer les repousses de blé de l'année précédente, les épidémies de jaunisse seraient vraisemblablement esquivées totalement, sans qu'aucun pesticide soit appliqué. Il est possible qu'un

bon réglage des moissonneuses, destinée à réduire au maximum la chute de grains incomplètement remplis, apporte en soi une contribution significative au contrôle de cette maladie virale. Ce second exemple illustre le fait qu'une méthode unilatérale peut être efficace bien qu'étant susceptible d'être contournée ; également, que des raisons diverses, qui ne relèvent pas de la protection des cultures directement, constitueront des obstacles à la mise en œuvre d'autres méthodes, intégrées ou non.

Question 2. Pourquoi intégrer ces méthodes dans des stratégies plus raffinées ?

L'une des raisons premières d'intégrer, ou de combiner, des instruments de gestion divers est de cumuler dans un même itinéraire technique un ensemble divers de freins à la multiplication des bio-agresseurs, ou de facteurs qui minimise la vulnérabilité des performances du peuplement végétal (rendement et qualité, notamment). Les définitions ci-dessus résument les leçons tirées des échecs passés de la protection des cultures, qu'il s'agisse de contournements (de résistances complètes) ou de l'adaptation de lignées de bio-agresseurs (aux pesticides), ou à d'autres obstacles imposant une pression de sélection massive et ponctuelle sur les bio-agresseurs. Dans beaucoup de cas (pas tous, cependant) ces interventions brutales visant un effet complet se sont soldées par (1) des échecs aux conséquences graves et (2) par une érosion des outils même employés (les gènes de résistance majeurs ou les molécules efficaces ne constituent pas une ressource inépuisable). En opposant aux bio-agresseurs, non pas des blocages, mais des freins à leur multiplication, et en diversifiant la nature des freins exercés, le résultat espéré est donc d'obtenir une protection à la fois efficace et durable.

Question 3. Comment construire ces stratégies de lutte ?

Différentes approches ont été adoptées pour l'élaboration de stratégies de méthodes de contrôle. Les efforts de modélisation constituent une illustration importante des approches de recherches suivies. Dès la fin des années 1960, les travaux de Forrester (1961) ont suscité beaucoup d'espoirs, fondés sur la construction de modèles de simulation. Des travaux ont abouti à un ensemble de modèles de simulation, notamment en phytopathologie pour l'helminthosporiose du maïs (EPIMAY, Waggoner *et al*, 1972), pour la tavelure du pommier (EPIVEN; Kranz *et al*, 1973), ou pour la septoriose du blé (Rapilly *et al*, 1977) (*Septoria nodorum*). Certaines approches de modélisation avaient spécifiquement un objectif de gestion, et une rationalisation de l'emploi de pesticides (Teng *et al*, 1978). Ces approches ont été par la suite exposées à un ensemble de critiques. Certaines d'entre elles avaient un fondement scientifique essentiel, concernant spécialement les techniques utilisées pour l'évaluation des modèles (Van der Plank, 1982), ou bien un fondement appliqué, concernant les perspectives d'utilisation même de ces modèles (Butt et Jeger, 1985). La construction de ces modèles en réalité répondait à deux types d'aspirations, qui sont incompatibles au moins partiellement. La première aspiration, à laquelle ces efforts répondent bien aujourd'hui encore, est de produire une synthèse quantitative des processus impliqués dans les dynamiques de population. En soi, ces synthèses quantitatives sont nécessaires, d'un strict point de vue des disciplines scientifiques impliquées : l'effort de synthèse permet un inventaire précis, objectif, des connaissances quantitatives sur des processus biologiques ; de ce fait, il permet d'identifier des zones d'ombre, d'incertitude, ou d'ignorance, où de nouvelles recherches seraient utiles. Cela étant, certains des modèles de ce type qui ont été élaborés sont, à cet égard, si exhaustifs qu'ils présentent un degré de complexité tel qu'il est très difficile de les évaluer. C'est à tort qu'ils ont été (1) perçus parfois par leurs concepteurs comme des instruments permettant de guider une gestion, (2) perçus souvent par des non-modélisateurs comme étant les instruments requis pour guider la gestion, (3) critiqués dans certains cas comme une volonté de tout embrasser, de tout expliquer, et de tout prédire. Utilisant des modèles de ce type, la seconde aspiration, prédire une dynamique, et pouvoir ainsi la contrecarrer, s'est trouvée être inopérante, car contradictoire avec la masse de données nécessaire à une prévision : il n'est plus possible d'utiliser pratiquement des modèles trop compliqués pour une prédiction.

Un exemple important d'application des techniques de simulation est BLITECAST, instrument qui a été élaboré pour rationaliser l'emploi de fongicides contre le mildiou de la pomme de terre. Hormis son intérêt pratique, le type d'approche que BLITECAST représente illustre bien leur souplesse : (1) il s'agit d'un modèle transparent, où l'on sait expliquer l'ordre des étapes qui sont envisagées et les facteurs d'environnement qui sont mis en avant comme déterminants majeurs des épidémies, (2) il est

possible d'y incorporer des processus spécifiques, tels que le lessivage des fongicides par la pluie, (3) il est possible d'incorporer dans le modèle des attributs propres au bio-agresseur, tels que sa capacité d'adaptation (résistance) aux fongicides employés. Ce type de modèle est au carrefour des éléments qui sans doute sont désirables : scientifiquement, il procède d'une science forte ; techniquement, il s'exprime sous une forme simple ; pratiquement il correspond à des objectifs concrets ; et structurellement, il est susceptible d'évolutions : il est possible de l'envisager comme point de départ vers de nouvelles recherches, incluant la pollution des eaux de ruisseau par des pesticides, ou l'effet de changement climatiques globaux, ou encore l'évolution, actuellement en cours, de la population de bio-agresseur consécutive à un remplacement progressif de populations locales par un nouveau génotype, des croisements entre groupes, et de nouvelles caractéristiques des populations qui en découlent (reproduction sexuée, variabilité génétique et formes de survie).

Hormis le rôle essentiel de synthèse quantitative qu'il jouent dans un champs de discipline donné, les techniques de simulation ont trouvé deux domaines d'application, pour lesquels ils semblent bien adaptés, sous certaines conditions : celui de la construction d'idéotypes (ce terme fait ici référence à des variétés résistantes, mais aussi des systèmes de production dans lesquels les risques d'épidémie sont acceptables), et celui de la décision tactique proprement dite. Dans ce dernier cas, EIPRE constitue aujourd'hui encore une référence importante, puisqu'il s'agit d'un système d'aide à la décision concernant simultanément les pucerons du blé (*Sitobion avenae* et *Rhopalosiphum padi*), la rouille brune (*Puccinia triticina*), la rouille jaune (*Puccinia striiformis*) et l'Oïdium (*Blumeria graminis*) (Zadoks, 1989). Il s'agit de l'exemple le plus accompli d'instrument de décision tactique à cibles multiples. Il est important de souligner que EIPRE (1) est né d'une étroite collaboration entre chercheurs et agriculteurs, (2) n'est pas un modèle de simulation dynamique, mais d'un ensemble d'équations paramétrées empiriquement, (3) mais que le choix de ces équations a été effectivement guidé par d'importantes recherches où la modélisation dynamique était l'instrument principal. La 'validation' (au sens non statistique du mot) n'est pas née de tests : elle a été fondée sur la mise en œuvre d'un outil par les agriculteurs, et leur satisfaction.

En protection des cultures comme ailleurs, prédire n'est pas expliquer. Mais, souvent, pouvoir prédire est en soi un objectif concret, louable, et utile. Pour prédire (à différentes échelles, à différents pas de temps), un ensemble très large de méthodes ont été élaborées. L'une d'entre elles, même si elle est ancienne, et a connu des raffinements au cours des années, est constituée par les techniques de régression (Butt et Royle, 1974), en particulier multiples. Il n'est pas possible, ici, de détailler l'ensemble des méthodes qui ont été utilisées pour construire des méthodes de lutte à partir d'une solide connaissance empirique des systèmes plantes - bio-agresseurs - environnement - pratiques culturales. Mais, certainement, les techniques de régression un exemple des instruments robustes, très efficaces, adaptés, et fiables - dans les limites du contexte où ils étaient élaborés.

L'expérience des quarante années passées indique qu'il n'y a pas de *vade mecum* général pour la construction de stratégies de lutte. Chaque cas est particulier. Mais l'expérience accumulée a généré des principes et des méthodes, un ensemble d'approches, expérimentales, analytiques, conceptuelles, qui sont maintenant disponibles pour le faire, ainsi qu'un ensemble d'exemples illustrant les conditions d'un échec, ou d'un succès. L'une de ces conditions est une étroite connaissance, voire une implication directe, des agriculteurs, car ils sont les acteurs de ces stratégies.

4.3. Les grandes cultures

4.3.1. Les bio-agresseurs des grandes cultures

Les principaux bio-agresseurs des grandes cultures appartiennent à quatre grandes catégories : les plantes adventices, les micro-organismes phytopathogènes, les arthropodes et les mollusques. Il est très difficile de dresser une liste exhaustive de l'ensemble des bio-agresseurs des grandes cultures tant le nombre d'espèces potentiellement nuisibles pour chacune des cultures considérées est important. De plus, les différentes espèces cultivées en grandes cultures sont soumises à des profils de bio-agresseurs très différents en fonction des conditions pédo-climatiques et du système de culture dans lequel elles s'insèrent. Enfin, les espèces cultivées en grandes cultures sont elles-mêmes nombreuses : blé tendre (*Triticum aestivum*), blé dur (*Triticum durum*), orge d'hiver et de printemps (*Hordeum vulgare*), avoine d'hiver et de printemps (*Avena sativa*), seigle (*Secale cereale*), sorgho (*Sorghum bicolor*), triticale (*X tritico-secale*), riz (*Oryza sativa*), sarrasin (*Fagopyrum esculentum*), épeautre (*Triticum spelta*), maïs (*Zea mays*), colza (*Brassica napus*), navette (*Brassica rapa*), moutarde (*Sinapis alba*), tournesol (*Helianthus annuus*), betterave (*Beta vulgaris*), pomme de terre (*Solanum tuberosum*), soja (*Glycine max*), lin (*Linum usitatissimum*), vesce (*Vicia sativa*), pois (*Pisum sativum*), lupin (*Lupinus albus*), féverole (*Vicia faba*), chanvre (*Cannabis Sativa*), tabac (*Nicotiana tabacum*), chicorée (*Cichorium intybus*)...

De manière schématique, on peut considérer que ce sont les adventices, puis les champignons pathogènes (maladies telluriques ou à dissémination aérienne) qui constituent les principaux ennemis des grandes cultures. Afin de balayer des zones de production, des périodes d'implantation, et des profils de bio-agresseurs variés, nous avons choisi d'illustrer les principaux bio-agresseurs de quatre grandes cultures : une céréale d'hiver (le blé), une céréale de printemps (le maïs), un oléagineux d'hiver (le colza), un oléagineux de printemps (le tournesol).

Adventices

Actuellement, le vulpin (*Alopecurus myosuroides*) est considéré comme la principale adventice des **céréales** en grande culture ; le ray-grass (*Lolium multiflorum*) et les folles-avoines (*Avena fatua* ; *A. sterilis*) pouvant également poser problème fréquemment (d'après Le Henaff *et al.*, 1999, 2000 ; Oste *et al.*, 2000 ; Le Henaff *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.* 2005). En outre, les adventices suivantes ont été signalées par le Service de la Protection des Végétaux dans les bilans de campagnes céréalières entre 1999 et 2005 : agrostis jouet du vent (*Apera spica venti*), avoine à chapelets (*Arrhenatherum elatius*), barbarée intermédiaire (*Barbarea intermedia*), bleuet (*Centaurea cyanus*), brome stérile (*Bromus sterilis*), calépine irrégulière (*Calepina irregularis*), capselle bourse à pasteur (*Capsella bursa-pastoris*), chardon (*Cirsium arvense*), chiendent (*Cynodon dactylon*), chrysanthème des moissons (*Chrysanthemum segetum*), coquelicot (*Papaver rhoeas*), éthuse cigüe (*Aethusa cynapium*), fumeterre officinale (*Fumaria officinalis*), gaillet grateron (*Galium aparine*), géraniums (*Geranium spp.*), laiteron des champs (*Sonchus arvensis*), laiteron rude (*Sonchus asper*), lamier pourpre (*Lamium purpureum*), liseron des champs (*Convolvulus arvensis*), liseron des haies (*Calystegia sepium*), matricaires (*Matricaria spp.*), pâturin commun (*Poa trivialis*), pâturin annuel (*Poa annua*), pensée (*Viola arvensis*), prêle des champs (*Equisetum arvense*), ravenelles (*Raphanus raphanistrum*), renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*), renouée liseron (*Fallopia convolvulus*), rumex (*Rumex spp.*), sanves (*Sinapis arvensis*), séneçon vulgaire (*Senecio vulgaris*), stellaire intermédiaire (*Stellaria media*), tussilage pas d'ane (*Tussilago farfara*), véronique (*Veronica hederifolia* et *V. persica*), vulpie queue de rat (*Vulpia myuros*) (d'après Le Henaff *et al.*, 1999, 2000 ; Oste *et al.*, 2000 ; Le Henaff *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.* 2005). Bien sûr cette liste n'est pas exhaustive et la flore d'une parcelle dépend fortement non seulement des conditions pédo-climatiques, mais aussi du système de culture, et notamment de la culture en place.

Les bilans de campagne du Service de la Protection des végétaux relèvent les adventices suivantes :
- pour le **maïs** : abutilon de Théophraste (*Abutilon theophrasti*), arroche étalée (*Atriplex patula*), arroche hastée (*Atriplex prostrata*), chénopodes (*Chenopodium spp.*), digitales (*Digitaria spp.*),

lampourde épineuse (*Xanthium spinosum*), liseron des haies (*Calystegia sepium*), mercuriale annuelle (*Mercurialis annua*), panics (*Panicum spp.*), renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*), renouée liseron (*Fallopia convolvulus*), sétaires (*Setaria spp.*), sicyos anguleux (*Sicyos angulatus*), sorgho d'Alep (*Sorghum halepense*), souchet comestible (*Cyperus esculentus*) (d'après David et Decoin, 1999 ; David *et al.*, 2000 ; Delos *et al.*, 2001 ; Guinefoleau *et al.*, 2002 ; Guinefoleau *et al.*, 2003 ; Faure *et al.*, 2004) ;

- pour le **colza** : crucifères bien sûr ; mais aussi ambrosie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*), ammi élevé (*Ammi majus*), anthriscus commun (*Anthriscus caucalis*), chrysanthème des moissons (*Chrysanthemum segetum*), géraniums (*Geranium spp.*), lampourde à gros fruits (*Xanthium strumarium*), matricaires (*Matricaria spp.*), orobanche (*Phelipaea ramosa*) (d'après Pilorgé, 1999 ; Huguet *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.*, 2005) ;

- pour le **tournesol** : crucifères, ambrosie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*), ammi élevé (*Ammi majus*), chardon des champs (*Cirsium arvense*), lampourde à gros fruits (*Xanthium strumarium*), éthuse ciguë (*Aethusa cynapium*) (Delos *et al.*, 2001 ; Delos *et al.*, 2002 ; Moissard *et al.*, 2003 ; Huguet *et al.*, 2004).

Les tableaux 4.3-1 à 4.3-4 permettent d'avoir une vue synthétique de l'occurrence et de la nuisibilité des principales mauvaises herbes des grandes cultures. Par ailleurs, on pourra se référer à l'Atlas de Répartition des Adventices en France développé par l'UMR INRA/ENESAD/UB Biologie et Gestion des Adventices à Dijon pour une description à une échelle régionale (<http://www.dijon.inra.fr/malherbo/araf/index.htm>).

| Espèce adventice | Co | CH | CP | Li | Po | Be | Pt | To | MS |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Géraniums (<i>Geranium sp.</i>) | | | | | | | | | |
| Anthémis des champs (<i>Anthemis arvensis</i> L) | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Matricaire chamomille (<i>Matricaria recutita</i> L) | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Carotte sauvage (<i>Daucus carota</i> L) | | | | | | | | | |
| Fumeterre officinale (<i>Fumaria officinalis</i> L) | ■ | | | | | | | | |
| Moutarde des champs (ou sanve ; <i>Sinapis arvensis</i> L) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Ravenelle (<i>Raphanus raphanistrum</i> L) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Capselle bourse à pasteur (<i>Capsella bursa pastoris</i> Moench) | ■ | ■ | | | | | | | |
| Euphorbe réveil-matin (<i>Euphorbia helioscopia</i> L) | | | | | | | | ■ | |
| Helminthie fausse vipérine (<i>Picris echioides</i> Gaertn) | | | | | | | | ■ | |
| Laiteron rude (<i>Sonchus asper</i> L, Hill) | | | | | | | | ■ | |
| Lamier pourpre (<i>Lamium purpureum</i> L) | ■ | ■ | | | | | | | |
| Lampsane commune (<i>Lapsana communis</i> L) | | | | | | | | | |
| Lychnis dioïque (<i>Silene pratensis</i> Rafn) | | | | | | | | | |
| Mouron des oiseaux (<i>Stellaria media</i> L) | ■ | ■ | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Séneçon commun (<i>Senecio vulgaris</i> L) | | | | | | | | | |
| Spergule des champs (<i>Spergula arvensis</i> L) | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | |
| Tabouret des champs (<i>Thlaspi arvense</i> L) | | ■ | ■ | | | | | | |
| Véronique de Perse (<i>Veronica presica</i> Poir) | ■ | ■ | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Ray-Grass (<i>Lolium multiflorum</i> Lam) | | | | | | | | | |
| Pâturin annuel (<i>Poa annua</i> L) | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| Pâturin commun (<i>Poa trivialis</i> L) | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| Chiendent rampant (<i>Agropyron repens</i> PB) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Tableau 4.3-1. Occurrence et nuisibilité des principales plantes adventices à germination-levée et pousse végétative possible pendant toute l'année.

Co : colza ; CH : céréales d'hiver ; CP : céréales de printemps ; Li : lin ; Po : pois ; Be : betterave ; Pt : pomme de terre ; Tournesol ; MS : maïs et sorgho. Adapté de Bailly *et al.* (1977).

| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
| ■ | par taches et nuisible | ■ | fréquente et nuisible |
| ■ | présente et peu nuisible à fréquente et nuisible | ■ | présente et peu nuisible |
| ■ | rare ou sans incidence à fréquente et nuisible | ■ | rare ou sans incidence |
| ■ | rare ou sans incidence à présente et peu nuisible | ■ | absente ou manque d'information |

| Espèce adventice | Co | CH | CP | Li | Po | Be | Pt | To | MS |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Adonis d'été (<i>Adonis aestivalis</i> L) | | | | | | | | | |
| Peigne de Vénus (<i>Scandix pecten-veneris</i> L) | | | | | | | | | |
| Gaillet gratteron (<i>Galium aparine</i> L) | | | | | | | | | |
| Shéardie des champs (<i>Sherardia arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Alchémille des champs (<i>Aphanes arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Armoise vulgaire (<i>Artemisia vulgaris</i> L) | | | | | | | | | |
| Bleuet (<i>Centaurea cyanus</i> L) | | | | | | | | | |
| Coquelicot (<i>Papaver rhœas</i> L) | | | | | | | | | |
| Miroir de Vénus (<i>Legousia speculum-veneris</i> L) | | | | | | | | | |
| Grémil des champs (<i>Buglossoides arvensis</i> L, IM Johnston) | | | | | | | | | |
| Myosotis des champs (<i>Myosotis arvensis</i> L, Hill) | | | | | | | | | |
| Renoncule des champs (<i>Ranunculus arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Véronique à feuille de lierre (<i>Veronica hederifolia</i> L) | | | | | | | | | |
| Valérianelle potagère (<i>Valerianella locusta</i> L) | | | | | | | | | |
| Pensée des champs (<i>Viola arvensis</i> Murray) | | | | | | | | | |
| Agrostis jouet du vent (<i>Apera spica venti</i> L) | | | | | | | | | |
| Vulpin des champs (<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds) | | | | | | | | | |
| Folles avoines (<i>Avena fatua</i> L et <i>Avena sterilis</i> L) | | | | | | | | | |

Tableau 4.3-2. Occurrence et nuisibilité des principales plantes adventices à germination-levée et pousse végétative automnale ou hivernale.

Co : colza ; CH : céréales d'hiver ; CP : céréales de printemps ; Li : lin ; Po : pois ; Be : betterave ; Pt : pomme de terre ; Tournesol ; MS : maïs et sorgho. Adapté de Bailly et al. (1977).

| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
| ■ | par taches et nuisible | ■ | fréquente et nuisible |
| ■ | présente et peu nuisible à fréquente et nuisible | ■ | présente et peu nuisible |
| ■ | rare ou sans incidence à fréquente et nuisible | ■ | rare ou sans incidence |
| ■ | rare ou sans incidence à présente et peu nuisible | ■ | absente ou manque d'information |

| Espèce adventice | Co | CH | CP | Li | Po | Be | Pt | To | MS |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Bifora rayonnante (<i>Bifora radians</i> Bieb) | | | | | | | | | |
| Arroche étalée (<i>Atriplex patula</i> L) | | | | | | | | | |
| Chénopode blanc (<i>Chenopodium album</i> L) | | | | | | | | | |
| Chrysanthème des moissons (<i>Chrysanthemum segetum</i> L) | | | | | | | | | |
| Chardon des champs (<i>Cirsium arvense</i> L) | | | | | | | | | |
| Laiteron des champs (<i>Sonchus arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Liseron des champs (<i>Convolvulus arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Renouée liseron (<i>Fallopia convolvulus</i> L, A Löve) | | | | | | | | | |
| Renouée des oiseaux (<i>Polygonum aviculare</i> L) | | | | | | | | | |
| Renouée persicaire (<i>Polygonum persicaria</i> L) | | | | | | | | | |
| Mouron rouge (<i>Anagalis arvensis</i> L) | | | | | | | | | |
| Linaire bâtarde (<i>Kickxia spuria</i> L, Dumort) | | | | | | | | | |
| Tussilage pas d'âne (<i>Tussilago farfara</i> L) | | | | | | | | | |

Tableau 4.3-3. Occurrence et nuisibilité des principales plantes adventices à germination-levée et pousse végétative printanière.

Co : colza ; CH : céréales d'hiver ; CP : céréales de printemps ; Li : lin ; Po : pois ; Be : betterave ; Pt : pomme de terre ; Tournesol ; MS : maïs et sorgho. Adapté de Bailly et al. (1977).

| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
| ■ | par taches et nuisible | ■ | fréquente et nuisible |
| ■ | présente et peu nuisible à fréquente et nuisible | ■ | présente et peu nuisible |
| ■ | rare ou sans incidence à fréquente et nuisible | ■ | rare ou sans incidence |
| ■ | rare ou sans incidence à présente et peu nuisible | ■ | absente ou manque d'information |

| Espèce adventice | Co | C _H | C _P | Li | Po | Be | Pt | To | MS |
|---|----|----------------|----------------|----|----|----|----|----|----|
| Amaranthe réfléchie (<i>Amaranthus retroflexus</i> L) | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Morelle noire (<i>Solanum nigrum</i> L) | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Mercuriale annuelle (<i>Mercurialis annua</i> L) | ■ | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Chiendent pied de poule (<i>Cynodon dactylon</i> Pers) | ■ | | | | | | | ■ | ■ |
| Panic pied de coq (<i>Echinochloa crus-galli</i> L) | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Sétaire glauque (<i>Setaria pumilia</i> Poir et, Røemer, Schultes) | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Digitaire sanguine (<i>Digitaria sanguinalis</i> Scop) | | | | | | | ■ | ■ | ■ |
| Digitaire filiforme (<i>Digitaria ischæmum</i> Sch et Sch, Mulh) | | | | | | | | | ■ |

Tableau 4.3-4. Occurrence et nuisibilité des principales plantes adventices à germination-levée et pousse végétative printanière.

Co : colza ; CH : céréales d'hiver ; CP : céréales de printemps ; Li : lin ; Po : pois ; Be : betterave ; Pt : pomme de terre ; Tournesol ; MS : maïs et sorgho. Adapté de Bailly et al. (1977).

| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
| ■ | par taches et nuisible | ■ | fréquente et nuisible |
| ■ | présente et peu nuisible à fréquente et nuisible | ■ | présente et peu nuisible |
| ■ | rare ou sans incidence à fréquente et nuisible | ■ | rare ou sans incidence |
| ■ | rare ou sans incidence à présente et peu nuisible | ■ | absente ou manque d'information |

Pathogènes

Les septorioses (principalement *Septoria tritici*) et le piétin-verse (principalement *Tapesia yallundae*) sont les principaux champignons pathogènes du **blé** ; la rouille jaune (*Puccinia striiformis*), la rouille brune (*Puccinia triticina*), les fusarioses (*F. avenaceum*, *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. roseum*, *Microdochium nivale* notamment) pouvant également exercer des pressions fortes en fonction des régions, des années climatiques et des pratiques (d'après Le Henaff *et al.*, 1999 ; Le Henaff *et al.*, 2000 ; Oste *et al.*, 2000 ; Le Henaff, 2002 ; Le Henaff, 2003 ; Le Henaff 2004 ; Delos *et al.* 2005).

Le **maïs** est généralement peu touché par les maladies et ne nécessite pas de protection fongicide en culture. Néanmoins, le charbon du maïs (*Ustilago maydis*), le charbon des inflorescences (*Sphacelotheca reiliana*), la rouille (*Puccinia sorghi*) et l'helminthosporiose (*Exserohilum turcicum*), et les fusarioses (*Fusarium culmorum*, *F. roseum*, *F. graminearum*) peuvent parfois être présents dans certaines régions (d'après David et Decoin, 1999 ; David *et al.*, 2000 ; Delos *et al.*, 2001 ; Guinefoleau *et al.*, 2002 ; Guinefoleau *et al.*, 2003 ; Faure *et al.*, 2004).

Le phoma (*Leptosphaeria maculans*) et la sclérotiniose (*sclerotinia sclerotiorum*) sont les deux principales maladies du **colza** (d'après Pilorgé, 1999 ; Huguet *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.*, 2005).

Pour le **tournesol**, le mildiou (*Plasmopora helianthi*) et le phomopsis (*Phomopsis helianti*) représentent généralement les principales maladies, même si la sclérotiniose (*sclerotinia sclerotiorum*) et le phoma (*Phoma mac-donaldii*), peuvent également être dangereux (d'après Pilorgé, 1999 ; Delos *et al.*, 2001 ; Delos *et al.*, 2002 ; Moïnard *et al.*, 2003 ; Huguet *et al.*, 2004).

Ravageurs

Certaines espèces cultivées sont particulièrement sensibles aux ravageurs du sol (par exemple le maïs) ou aux insectes (par exemple, le colza).

En **céréales**, les ravageurs suivants sont parfois mentionnés par le Service de la Protection des Végétaux : bibions (*Bibio spp.*) ; cécidomyies (*Contarinia tritici* et *Sitodiplosis mosellana*) ; cicadelles (*Psammotettix alienus*), vecteurs du virus de la maladie des pieds chétifs (Wheat Dwarf Virus) ; criocères (*Oulema melanopus* et *O. lichenis*) ; limaces (principalement *Deroceras reticulatum*) ; mouches des semis (*Delia platura*) ; mouches grises (*Delia coarctata*) ; mouches jaunes (*Opomyza florum*) ; mouches mineuses (*Agromyza spp.*), oscinies (*Oscinella frit* et *O. pusilla*) ; pucerons (*Rhopalosiphum padi* ; *Sitobion avenae*), vecteurs de la Jaunisse Nanisante de l'Orge (VJNO, ou BYDV, Barley Yellow Dwarf Virus) ; taupins (*Agriotes lineatus*) ; tenthrèdes des céréales (*Dolerus*

haematodes) ; tipules (*Tipula spp.*, principalement *T. paludosa* et *T. oleracea*) ; tordeuses des céréales (*Cnephasia pumicana*) ; zabres (*Zabrus tenebrioides*) (d'après Le Henaff *et al.*, 1999, 2000 ; Oste *et al.*, 2000 ; Le Henaff *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.* 2005).

Le **maïs** est beaucoup plus sensible aux ravageurs que les autres céréales des grandes cultures. La pyrale (*Ostrinia nubilalis*) et la sésamie (*Sesamia nonagrioides*) sont des ennemis classiques, mais beaucoup d'autres ravageurs s'attaquent également au maïs : acarïens (*Tetranychus urticae*, *T. turkestanii*) ; cicadelles (*Zyginidia scutellaris*) ; chrysomèles des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*) ; limaces (*Doroceras reticulatum* notamment) ; mouches des semis (*Delia platura*) ; nématodes (*Ditylenchus dipsaci*, *Heterodera avenae*, *Pratylenchus penetrans*) ; noctuelles (*Agrotis ipsilon*, *A. segetum*, *Autographa gamma*, *Heliotis armigera*, *Mythimna unipunctata* notamment) ; oscinies (*Oscinella frit*) ; pucerons (*Rhopalosiphum padi*, *Sitobion avenae*, *Metopolophium dirhodum*), vecteurs de viroses (Jaunisse Nanisante de l'Orge, VJNO ou BYDV, Barley Yellow Dwarf Virus ; mosaïque nanisante due au virus MDMV, Maize Dwarf Mosaic Virus) ; scutigérelles (*Scutigerebella immaculata*) ; taupins (*Agriotes sordidus* notamment) (d'après David et Decoin, 1999 ; David *et al.*, 2000 ; Delos *et al.*, 2001 ; Guinefoleau *et al.*, 2002 ; Guinefoleau *et al.*, 2003 ; Faure *et al.*, 2004).

De même, le **colza** subit les attaques de nombreux ravageurs : baris (*Baris coerulescens*) ; cécidomyies (*Dasineura brassicae*) ; charançons de la tige (*Ceuthorhynchus napi*) ; charançons du bourgeon terminal (*Ceuthorhynchus pictarsis*) ; charançons de siliques (*Ceuthorhynchus assimilis*) ; petites altises (*Phyllotreta spp.*) et grosses altises (*Psylliodes chrysocephala*) ; méligèthes (*Meligethes aeneus* et *M. viridescens*) ; mouches du chou (*Delia radicum*), noctuelles (*Heliotis armigera*) ; piérides du chou (*Pieris brassicae*) ; pucerons cendrés (*Brevicoryne brassicae*) ; pucerons verts du pêcher (*Myzus persicae*) ; teignes des crucifères (*Plutella maculipennis*) ; tenthrèdes de la rave (*Athalia rosae*) ; taupins (*Agriotes spp.*) ; thrips (*Frankliniella occidentalis*, *Thrips tabaci* notamment) (d'après Pilorgé, 1999 ; Huguet *et al.*, 2002, 2003, 2004 ; Delos *et al.*, 2005).

Limaces (*Deroceras reticulatum*, *Arion hortensis* notamment) ; noctuelles (*Autographa gamma*) ; pucerons (*Brachycaudus helichrysi* notamment) ; taupins (*Agriotes spp.*) sont les rares ravageurs du **tourne-sol** rapportés par le Service de la Protection des Végétaux (d'après Pilorgé, 1999 ; Delos *et al.*, 2001 ; Delos *et al.*, 2002 ; Moïnard *et al.*, 2003 ; Huguet *et al.*, 2004).

Bien sûr, il n'est pas possible ici de dresser une typologie fine des profils de bio-agresseurs car ceux-ci dépendent éminemment de la situation de production et notamment du système de culture. Par exemple, les problèmes de limaces sont présents dès lors que la simplification du travail du sol se développe et laisse une quantité importante de résidus végétaux à la surface du sol. De même, les nématodes sont souvent associés au retour fréquent de certaines espèces (monoculture de céréales)...

Les tableaux 4.3-5 à 4.3-12 présentent les principales maladies et ravageurs du blé, du maïs, du colza et du tourne-sol.

Maladies et ravageurs du blé

| Maladie (agent pathogène) | Risque |
|---|--------|
| Piétin-verse (<i>Tapesia yallundae</i> , <i>T. acuformis</i>) | |
| Septorioses (<i>Septoria tritici</i> , <i>Septoria nodorum</i>) | |
| Fusarioses (<i>Fusarium culmorum</i> , <i>Fusarium graminearum</i> , <i>Microdochium nivale</i> notamment) | |
| Rouille brune (<i>Puccinia triticina</i>) | |
| Rouille jaune (<i>Puccinia striiformis tritici</i>) | |
| Oïdium (<i>Blumeria graminis</i>) | |
| Piétin-échaudage (<i>Gaeumannomyces graminis</i> var <i>Tritici</i>) | |
| Carie (<i>Tilletia caries</i>) | |
| Charbon (<i>Ustilago segetum tritici</i>) | |
| Helminthosporose (<i>Helminthosporium teres</i>) | |
| Jaunisse nanisante de l'orge (Barley Yellow Dwarf Virus) | |
| Rhizoctone (<i>Rhizoctonia solani</i>) | |

Tableau 4.3-5. Risque moyen national de pertes de rendement des principales maladies du blé (d'après Le Henaff et al, 1999 ; Le Henaff et al., 2000 ; Oste et al., 2000 ; Le Henaff, 2002 ; Le Henaff, 2003 ; Le Henaff 2004 ; Delos et al. 2005 ; et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

| Ravageur | Risque |
|---|--------|
| Campagnol des champs (<i>Microtus arvalis</i>) | |
| Corbeau freux (<i>Corvus frugigelus</i>) | |
| Criocère de l'orge (<i>Oulema melanopa</i>) | |
| Etourneau sansonnet (<i>Sturnus vulgaris</i>) | |
| Mineuse (<i>Agromyza</i> spp.) | |
| Moineau domestique (<i>Passer domesticus</i>) | |
| Mouche grise des céréales (<i>Delia coarctata</i>) | |
| Mulot (<i>Apodemus sylvaticus</i>) | |
| Nématode de l'avoine (<i>Heterodera avenae</i>) | |
| Nématode des céréales (<i>Meloidogyne naasi</i>) | |
| Oscinie de l'avoine (<i>Oscinella frit</i>) | |
| Petite limace grise (<i>Deroceras reticulatum</i>) | |
| Puceron du merisier à grappe (<i>Rhopalosiphum padi</i>) | |
| Puceron des épis des céréales (<i>Sitobion avenae</i>) | |
| Puceron des céréales et du rosier (<i>Metopolophium dirhodum</i>) | |
| Thrips des céréales (<i>Limothrips cerealium</i>) | |
| Tipule des prairies (<i>Tipula paludosa</i>) | |

Tableau 4.3-6. Risque moyen national de pertes de rendement des principaux ravageurs du blé (d'après Le Henaff et al, 1999 ; Le Henaff et al., 2000 ; Oste et al., 2000 ; Le Henaff, 2002 ; Le Henaff, 2003 ; Le Henaff 2004 ; Delos et al. 2005 ; et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

Maladies et ravageurs du maïs

| Maladie (agent pathogène) | Risque |
|---|--------|
| Anthraxose du maïs (<i>Colletotrichum graminicola</i>) | |
| Charbon à Ustilago (<i>Ustilago maydis</i>) | |
| Charbon des inflorescences à Sphacelotheca (<i>Sphacelotheca reiliana</i>) | |
| Fonte des semis (<i>Pythium spp.</i> , <i>Fusarium spp.</i>) | |
| Fusarioses (<i>Fusarium spp.</i>) | |
| Helminthosporioses (<i>Exserohilum turcicum</i> , <i>Bipolaris zeicola</i>) | |
| Jaunisse nanisante de l'orge, Barley Yellow Dwarf Virus (via <i>R. padi</i> et <i>S. avenae</i>) | |
| Kabatiellose du maïs (<i>Kabatiella zae</i>) | |
| Mildiou du maïs (<i>Sclerospora macrospora</i>) | |
| Nanisme rugueux, Maize Rough Dwarf Virus (via <i>Laodelphax striatellus</i>) | |
| Nécroses racinaires (<i>Pythium arrhenomanes</i> ; <i>Rhizoctonia solani</i>) | |
| Pourriture bactérienne (<i>Erwinia chrysanthemi</i>) | |
| Rouille du maïs (<i>Puccinia sorghi</i>) | |

Tableau 4.3.1.7. Risque moyen national de pertes de rendement des principales maladies du maïs (d'après David et Decoin, 1999 ; David et al., 2000 ; Delos et al., 2001 ; Guinefoleau et al., 2002 ; Guinefoleau et al., 2003 ; Faure et al., 2004 et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

| Ravageur | Risque |
|--|--------|
| Acarien (<i>Tetranychus urticae</i> , <i>T. turkestanii</i>) | |
| Corbeau freux (<i>Corvus frugilegus</i>) | |
| Limaces (<i>Deroceras reticulatum</i> notamment) | |
| Mouche des semis (<i>Delia platura</i>) | |
| Mulot sylvestre (<i>Apodemus sylvestris</i>) | |
| Nématodes (<i>Pratylenchus spp.</i>) | |
| Nématode à kyste des céréales (<i>Heterodera avenae</i>) | |
| Noctuelle (<i>Heliothis zae</i> , <i>Mythimna unipuncta</i> , notamment) | |
| Oscinie (<i>Oscinella frit</i>) | |
| Puceron des épis des céréales (<i>Sitobion avenae</i>) | |
| Puceron des céréales et du rosier (<i>Metopolophium dirhodum</i>) | |
| Puceron du merisier à grappe (<i>Rhopalosiphum padi</i>) | |
| Pyrale du maïs (<i>Ostrinia nubilalis</i>) | |
| Sésamie (<i>Sesamia nonagrioides</i>) | |
| Taupin (<i>Agriotes spp.</i>) | |
| Tipule (<i>Tipula paludosa</i> , <i>T. oleracea</i>) | |
| Vers gris, chenilles de noctuelles (<i>Agrotis ipsilon</i> et <i>A. segetum</i> principalement) | |
| Cicadelle des céréales (<i>Zyginidia scutellaris</i>) | |
| Nématodes des tiges (<i>Ditylenchus dipsaci</i>) | |
| Scutigérelle (<i>Scutigera immaculata</i>) | |
| Altise (<i>Phyllotreta vittula</i>) | |
| Alucite des céréales (<i>Sitotroga cerealella</i>) | |
| Blaniule moucheté (<i>Blaniulus guttulatus</i>) | |
| Courtillière (<i>Gryllotalpa gryllotalpa</i>) | |
| Hépiale (<i>Hepialus humuli</i> et <i>H. lupulinus</i>) | |
| Mouche des plantules de maïs (<i>Geomyza tripunctata</i>) | |
| Pie (<i>Pica pica</i>) | |
| Vers blanc, larve du hanneton commun (<i>Melolontha melolontha</i>) | |

Tableau 4.3.1.8. Risque moyen national de pertes de rendement des principaux ravageurs du maïs (d'après David et Decoin, 1999 ; David et al., 2000 ; Delos et al., 2001 ; Guinefoleau et al., 2002 ; Guinefoleau et al., 2003 ; Faure et al., 2004 et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Maladies et ravageurs du colza

| Maladie (agent pathogène) | Risque |
|--|--------|
| Phoma (<i>Leptosphaeria maculans</i>) | |
| Sclérotiniose (<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>) | |
| Alternariose (<i>Alternaria brassicae</i>) | |
| Botrytis (<i>Botrytis cinerea</i>) | |
| Cylindrosporiose (<i>Cylindrosporium concentricum</i>) | |
| Hernie (<i>Plasmodiophora brassicae</i>) | |
| Mildiou (<i>Peronospora brassicae</i>) | |
| Oïdium (<i>Blumeria polygoni</i>) | |
| Pseudo-cercosporella (<i>Pseudo-cercospora capsellae</i>) | |
| Verticillium (<i>Verticillium dahliae</i>) | |
| Mosaïque du chou-fleur (<i>Cabbage Mosaic Virus</i>) | |
| Mosaïque du navet (<i>Turnip Mosaic Virus</i>) | |
| Jaunisse de la betterave (<i>Beet Western Yellows Virus</i>) | |
| Jaunisse du navet (<i>Turnip Yellow Mosaic Virus</i>) | |

Tableau 4.3-9. Risque moyen national de pertes de rendement des principales maladies du colza (d'après Pilorgé, 1999 ; Huguet et al., 2002, 2003, 2004 ; Delos et al., 2005 et HYPP, 1995 ; Maurin et al., 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

| Ravageur | Risque |
|---|--------|
| Altise d'hiver du colza (<i>Psylliodes chrysocephala</i>) | |
| Altise noire des crucifères (<i>Phyllotreta atra</i> notamment) | |
| Cécidomyie des siliques des crucifères (<i>Dasineura brassicae</i>) | |
| Charançon de la tige du colza (<i>Ceuthorhynchus napi</i>) | |
| Charançon des siliques du colza (<i>Ceuthorhynchus assimilis</i>) | |
| Limaces (<i>Deroceras reticulatum</i> , <i>Arion hortensis</i> notamment) | |
| Méligèthe du colza (<i>Meligethes aeneus</i> , <i>M. viridescens</i>) | |
| Méligèthe des crucifères (<i>Meligethes viridescens</i>) | |
| Mouche du chou (<i>Delia radicum</i>) | |
| Puceron cendré du chou (<i>Brevicoryne brassicae</i>), vecteur de viroses | |
| Charançon du bourgeon terminal (<i>Ceuthorhynchus piciparsis</i>) | |
| Pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) | |
| Puceron noir de la fève (<i>Aphis fabae</i>) | |
| Puceron vert du pêcher (<i>Myzus persicae</i>) | |
| Charançon de la tige du chou (<i>Ceuthorhynchus quadridens</i>) | |
| Charançon galicol du chou (<i>Ceuthorhynchus pleurostigma</i>) | |
| Cétoine hérissée (<i>Epicometis hirta</i>) | |
| Piéride du chou (<i>Pieris brassicae</i>) | |
| Teigne des crucifères (<i>Plutella maculipennis</i>) | |
| Tenthrede de la rave (<i>Athalia rosae</i>) | |

Tableau 4.3-10. Risque moyen national de pertes de rendement des principaux ravageurs du colza (d'après Pilorgé, 1999 ; Huguet et al., 2002, 2003, 2004 ; Delos et al., 2005 et HYPP, 1995 ; Maurin et al., 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

Maladies et ravageurs du tournesol

| Maladie (agent pathogène) | Risque |
|---|--------|
| Maladie des taches noires (<i>Phoma mac-donaldii</i>) | |
| Mildiou du tournesol (<i>Plasmopora helianthi</i> , <i>P. halstedii</i>) | |
| Phomopsis (<i>Phomopsis helianthi</i>) | |
| Sclérotionose (<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>) | |
| Alternariose (<i>Alternaria helianthi</i>) | |
| Pourriture charbonneuse (<i>Macrophomina phaseoli</i>) | |
| Pourriture grise (<i>Botrytis cinerea</i>) | |
| Verticilliose (<i>Verticillium albo-atrum</i> , <i>V. dahliae</i>) | |
| Fonte des semis (<i>Pythium spp.</i> , <i>Sclerotinia spp.</i> , <i>Botrytis spp.</i> , <i>Plasmopora spp.</i>) | |
| Rouille blanche des Astéracées (<i>Albugo tragopogonis</i>) | |

Tableau 4.3-11. Risque moyen national de pertes de rendement des principales maladies du tournesol (d'après Pilorgé, 1999 ; Delos et al., 2001 ; Delos et al., 2002 ; Moissard et al., 2003 ; Huguet et al., 2004 et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

| Ravageur | Risque |
|---|--------|
| Limace (<i>Deroceras reticulatum</i> , <i>Arion hortensis</i>) | |
| Linotte mélodieuse (<i>Carduelis Cannabina</i>) | |
| Moineau domestique (<i>Passer domesticus</i>) | |
| Noctuelle gamma (<i>Autographa gamma</i>) | |
| Puceron (<i>Brachycaudus helichrysi</i> notamment) | |
| Tipule (<i>Tipula paludosa</i> , <i>T. oleracea</i>) | |
| Taupin (<i>Agriotes ssp.</i>) | |
| Thrips (<i>Thrips tabaci</i> , <i>T. angusticeps</i>) | |
| Verdier (<i>Carduelis chloris</i>) | |
| Bianiule (<i>Blaniulus guttulatus</i>) | |
| Campagnole (<i>Microtus arvalis</i> , <i>Arvicola terrestris</i> , <i>Pitymys duodecimcostatus</i>) | |
| Lapin de Garenne (<i>Oryctolagus cuniculus</i>) | |
| Vanesse de l'artichaut (<i>Vanessa cardui</i>) | |
| Perdrix (<i>Perdix perdix</i>) | |
| Pigeon ramier (<i>Columba palumbus</i>) | |
| Punaise (<i>Lygus spp.</i>) | |
| Pyrale du tournesol (<i>Homoeosoma nebulella</i>) | |
| Vers gris, chenilles de noctuelles (<i>Agrotis ipsilon</i> , <i>A. segetum</i>) | |

Tableau 4.3-12. Risque moyen national de pertes de rendement des principaux ravageurs du tournesol (d'après Pilorgé, 1999 ; Delos et al., 2001 ; Delos et al., 2002 ; Moissard et al., 2003 ; Huguet et al., 2004 et HYPP, 1995 ; Maurin et al, 1999).

Les classes de risque (cf. définition donnée au chapitre 4.1.7.) correspondent à une péréquation des informations contenues dans ces références pour une situation de production moyenne à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Localement, ces classes peuvent donc être différentes en fonction du système de culture et du pédo-climat régional.

fort
 moyen
 faible

4.3.2. Les pratiques actuelles

4.3.2.1. Panorama général

Les grandes cultures représentent une surface cultivée importante : 8,7 Mha, soit 34% de la SAU en 2003 (Source : Agreste, Enquête structure 2003, <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>) et constituent donc un enjeu important vis-à-vis de la maîtrise des nuisances environnementales liées à la protection des cultures. Nous proposons un tableau synoptique présentant l'efficacité des méthodes de lutte actuelles contre différents bio-agresseurs des grandes cultures (tableau 4.3-13). Une telle synthèse ne peut refléter la variabilité due aux espèces cultivées considérées, aux systèmes de culture et aux conditions pédo-climatiques rencontrées. L'intérêt d'un tel tableau réside uniquement dans la proposition d'une vision générale, qui ne pourra cependant correspondre parfaitement à toutes les situations de production. En résumé, on pourra retenir qu'en grandes cultures, la protection contre les bio-agresseurs repose tout d'abord sur un usage important de pesticides (par ordre décroissant de volumes utilisés : herbicides, fongicides et insecticides), puis sur l'utilisation de variétés possédant une résistance (tout phénomène qui, chez un végétal, interdit ou limite le développement d'un pathogène ; d'après Rapilly, 1991) ou une tolérance (tout phénomène qui, chez un végétal, fait que le potentiel de rendement d'une plante n'est pas altéré par un pathogène ; d'après Rapilly, 1991) face à différents agents pathogènes, et des éléments de contrôle cultural ou physique (succession des cultures et travail du sol notamment, tableau 4.3-13).

| Principaux groupes de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre | | | | |
|--|--|--|----------------------|------------------|----------------|------------------------|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Lutte physique | Système de culture (7) |
| Champignons pathogènes (<i>sensu lato</i>) | ++ | +++ (1) | ++ | + (4) | + | ++ |
| Adventices | +++ | ++ (2) | - | - | ++ (6) | +++ |
| Bactéries | + | - | + | - | - | + |
| Virus, viroïdes et mycoplasmes | + | + (3) | - | - | - | ++ |
| Acarions | + | + | - | - | - | + |
| Insectes | + | ++ (1) | - | + (5) | - | ++ |
| Nématodes | + | - | - | - | - | + |
| Limaces | + | ++ | - | - | - | + |

Tableau 4.3-13. Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre sur l'ensemble des grandes cultures.

1. Traitements de semences ou application en culture
2. Traitements de pré-semis, de pré- ou post-levée
3. Lutte contre les vecteurs
4. Lutte contre la sclérotiniose (*Sclerotinia sclerotiorum*) de différentes cultures par un champignon (*Coniothyrium minitans*)
5. Lutte contre la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) par des trichogrammes (*Trichogramma brassicae*), 85000 ha protégés en 2004 (source : <http://www.biotop.fr/>)
6. Lutte mécanique contre les mauvaises herbes (faux semis, binage, hersage, sarclage, fauche), lutte thermique
7. L'effet des successions des cultures est important pour les organismes peu mobiles (champignons telluriques, mauvaises herbes, nématodes...). Le travail du sol permet d'enfouir les résidus porteurs d'inoculum et de gérer le stock semencier de mauvaises herbes. L'itinéraire technique permet d'adapter la réceptivité du couvert à différents bio-agresseurs et sa compétitivité face aux mauvaises herbes.

Dans le cas du **blé** (Tableau 4.3-14), les bio-agresseurs les plus importants (en termes de pertes de récoltes qu'ils causeraient sans protection adéquate) sont les adventices et les maladies cryptogamiques (fongiques). Le contrôle des adventices peut mettre en œuvre des instruments efficaces, s'ils sont utilisés à bon escient : les méthodes associées aux pratiques culturales et la lutte chimique. En moyenne en France, le blé tendre a reçu 6 traitements en 2001, dont un tiers environ pour le

désherbage. Ce nombre moyen cache en fait une forte variabilité régionale puisque si l'on a observé en moyenne 9 traitements phytosanitaires en Picardie ; seulement 3 traitements phytosanitaires ont été appliqués en Alsace en 2001 (cf. chapitre 2). Le contrôle des maladies cryptogamiques est, dans une très large mesure assurée par des résistances de type divers (complètes ou non, spécifiques, ou pas) ; mais la protection chimique joue un rôle très important pour un nombre limité de maladies. Les pratiques culturales contribuent à la protection des cultures contre les maladies cryptogamiques, notamment (mais non exclusivement) pour les maladies d'origine tellurique.

| Principaux groupes de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre | | | | |
|---|--|--|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
| Champignons pathogènes (<i>sensu lato</i>) <i>Septorioses, rouilles, fusarioses, piétins, oidium</i> | +++ | ++ (1) | +++ | - | + (4) | ++ (6) |
| Adventices <i>Vulpin et ray-grass</i> notamment | +++ | ++ (2) | - | - | ++ | +++ (7) |
| Virus, viroïdes et mycoplasmes <i>Jaunisse nanisante de l'orge</i> | + | +(3) | - | - | +(5) | - |
| Insectes <i>Pucerons, mouches, taupins</i> | + | ++ | + | - | + | + |
| Nématodes | + | - | + | - | - | ++ (8) |
| Limaces | + | + | - | - | - | ++ (9) |

Tableau 4.3-14. Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre sur blé d'hiver.

1. Traitements de semences ou application en culture
2. Traitements de pré-semis, de pré- ou post-levée
3. Lutte contre les pucerons, vecteurs de viroses
4. Par exemple, la gestion des repousses par des opérations de déchaumage influence la survie estivale de la rouille brune (*Puccinia triticina*)
5. Par exemple, la gestion des repousses estivales par des opérations de déchaumage influence le cycle des pucerons, vecteurs de viroses
6. Les maladies telluriques notamment sont sensibles à l'interaction entre le travail du sol et les précédents, la date et la densité de semis, la fertilisation azotée (dose et forme)
7. La période d'implantation est un levier pour défavoriser certaines mauvaises herbes qui ne lèvent qu'à une période donnée de l'année. Le travail du sol, et notamment le labour, permet de gérer le stock semencier des mauvaises herbes.
8. Diminuer la fréquence de retour des céréales, adapter la date de semis et le travail du sol permettent de contrôler les nématodes.
9. Par exemple, l'enfouissement des résidus de culture est défavorable au développement des limaces.

En 2000, le **maïs** couvrait 7% de la SAU et représentait 10% de la consommation nationale en pesticides (cf. chapitre 2). Les principaux traitements phytosanitaires du maïs concernent la maîtrise des mauvaises herbes (près de 75% des quantités de pesticides épandues sur maïs), puis dans une moindre mesure, la maîtrise des insectes (Tableau 4.3-15). Les instruments principaux du contrôle des adventices, comme dans le cas précédent, sont les pratiques culturales, le choix des successions, et les méthodes ayant recours aux pesticides. Est mentionné l'emploi de transgènes résistants aux herbicides, qui constitueraient un nouvel instrument très efficace de contrôle ; cet instrument ne peut pas être utilisé en France. L'interdiction de l'atrazine a limité l'éventail des solutions (spectre et persistance) et augmenté le coût du désherbage. Le contrôle des mauvaises herbes doit donc s'adapter à l'évolution de la flore (émergence d'une flore dicotylédone jusqu'alors peu présente). Comme l'efficacité des programmes herbicides se trouve diminuée, le nombre de passages augmente jusqu'au recouvrement de l'inter-rang (Desquenes et Bibard, 2004). Le contrôle des insectes passe d'abord par une lutte

chimique, dans l'ensemble efficace si elle est correctement utilisée. Avec la disparition de nombreux insecticides du sol, la pression exercée par les ravageurs telluriques (taupins, scutigérelle, nématodes...) va certainement augmenter dans les prochaines années (Faure *et al*, 2004). Il faut remarquer que le maïs est la seule grande culture pour laquelle une méthode de lutte biologique contre un ravageur est développée à assez grande échelle (85.10³ ha de maïs ont été protégés par des trichogrammes en 2004, sources : www.biotop.fr). Les pratiques culturales contribuent, dans certains cas également à un contrôle efficace des ravageurs.

| Principaux groupes de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre | | | | |
|--|--|--|----------------------|------------------|----------------------------|---|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
| Champignons pathogènes Charbon des inflorescences | + | ++ (1) | +++ | - | - | ++ (2, itinéraires techniques) |
| Adventices | +++ (3) | ++ (4) | +++ (5) | - | ++ (6) | ++ (successions, itinéraires techniques) |
| Insectes Taupins Pyrale Sésamie (Sud) | ++ +++ +++ | ++ (7) +++ ++ | - ++ (8) - | - ++ (9) - | - - - | - ++ ++ (itinéraires techniques) |

Tableau 4.3-15. Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre sur maïs.

1. Traitement de semences ou en localisation
2. Enfouissement des résidus de récolte par le labour
3. 10-15 espèces majeures (dicotylédones) si maïs en rotation avec une pression modérée (10-50 pl/m²) ; 4-6 espèces majeures (graminées estivales) si maïs en monoculture (forte pression : 50-100 pl/m²)
4. Atrazine interdite en 2003
5. Uniquement si autorisation de maïs OGM résistants à certains herbicides
6. Désherbinage par exemple
7. Interdiction fipronil et imidaclopride en tant que traitement de semences
8. Uniquement si autorisation de maïs OGM BT
9. Lutte biologique par les trichogrammes (capsules)

Dans le cas du **colza** (Tableau 4.3-16), les bio-agresseurs les plus importants sont, également, les adventices et certaines maladies cryptogamiques (ces dernières moins diverses et moins nombreuses que celles du blé). Outre ses intérêts agronomiques reconnus, le colza est réputé être une culture favorable à l'environnement grâce à sa capacité à piéger les nitrates. Néanmoins, la moyenne nationale du nombre de traitements phytosanitaires (hors anti-limaces) est tout de même élevée, avec 5,2 traitements en 2003 (Wagner, 2004), ce qui réduit quelque peu les avantages environnementaux de la culture. En effet, la part des pesticides utilisés en agriculture pour le colza est de 9% alors qu'il ne représente que 4% de la SAU (cf. chapitre 2). Dans près de 94% des situations, un programme de désherbage en pré ou post-semis et/ou pré ou post-levée est utilisé. L'adaptation du système de culture permet de disposer d'un levier supplémentaire pour contrôler les mauvaises herbes (Tableau 4.3-16). Les applications d'insecticides sont fréquentes à l'automne et au printemps. En ce qui concerne la protection chimique contre les champignons, un faible pourcentage d'agriculteurs procède à des applications contre le phoma à l'automne (avec un maximum de 9% en Poitou-Charente en 2003) ; en revanche, au printemps (plus précisément au moment de la chute des pétales), les traitements contre la sclérotiniose sont très fréquents, car il n'existe pas de variété résistante ou tolérante au sclérotinia. On peut signaler qu'un agent de lutte biologique (*Coniothyrium minitans*, commercialisé sous le nom de Contans®) a été homologué récemment en traitement du sol pour lutter contre la sclérotiniose. Nous manquons pour l'instant de recul quant à l'importance de l'utilisation de cet agent microbiologique en grandes cultures.

| Principaux groupes de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre | | | | |
|---|--|--|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
| Champignons pathogènes (<i>sensu lato</i>) <i>Phoma</i> <i>Sclerotinia</i> | ++ | ++ (1) | ++ (3) | + (4) | + (5) | ++ (7) |
| Adventices | +++ | ++ (2) | - | - | ++ (6) | +++ (8) |
| Insectes <i>Altises</i> <i>Charançons</i> <i>Meligèthes</i> <i>Pucerons</i> | ++ | ++ | - | - | - | - |
| Limaces | ++ | ++ | - | - | - | + |

Tableau 4.3-16. Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre sur colza d'hiver.

1. Application en culture
2. Traitements de pré-semis, de pré- ou post-levée
3. Il existe des résistances complètes et partielles efficaces contre le phoma. Une résistance complète très efficace (Rlm1) a été contournée à la fin des années 90. Il n'y a pas de résistance contre la sclérotiniose.
4. Lutte contre la sclérotiniose (*Sclerotinia sclerotiorum*) de différentes cultures par un champignon (*Coniothyrium minitans*)
5. De manière indirecte, le travail du sol déplace les résidus de culture et donc influence les cycles épidémiques de certains pathogènes tels *Leptosphaeria maculans* ou *Sclerotinia sclerotiorum*.
6. Lutte mécanique contre les mauvaises herbes (faux semis, binage, hersage).
7. L'interaction entre le travail du sol et la succession influence la quantité d'inoculum primaire qui peut être dispersé sur plusieurs kilomètres (phoma), ou au contraire rester dans la parcelle (sclérotines de sclérotinia). La conduite de la culture influence fortement la réceptivité du peuplement aux contaminations.
8. La succession, le travail du sol, la gestion de l'azote dans le système de culture, la date et la densité de semis influencent fortement la compétitivité du colza vis-à-vis des mauvaises herbes.

| Principaux groupes de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre | | | | |
|--------------------------------------|--|--|----------------------|------------------|----------------------------|----------------------------------|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
| Champignons pathogènes Mildiou | +++ | +++ | +++ (2) | - | - | + (3, 4) |
| Sclerotinia | +++ | - | ++ | + (5) | - | ++ (6, 7) |
| Phomopsis | +++ | +++ | +++ | - | - | + (7, 8) |
| Phoma | +++ | ++ (9) | + | - | - | + (8, 10) |
| Adventices | ++ | ++ (11) | - | - | ++ | ++ (itinéraires techniques) (12) |
| Limaces | + | ++ | - | - | - | ++ (13) |

Tableau 4.3-17. Efficacité actuelle des méthodes de lutte mises en œuvre sur tournesol

1. Traitement de semences (mefenoxam), pas de lutte fongicide en végétation
2. Efficace mais risque de contournement (nouvelles races physiologiques de mildiou)
3. L'allongement de la rotation (retour tous les 3-4 ans) et la destruction des repousses réduisent la quantité d'inoculum
4. Eviter l'implantation en conditions humides
5. Contans (lutte contre les sclérotines par un champignon *Coniothyrium minitans*)
6. Les rotations à base de pois, soja, tournesol et colza favorisent le sclérotinia (production de sclérotines qui se conservent dans le sol)
7. Réduction de la densité de peuplement et de la fertilisation azotée, pas d'irrigation
8. Enfouissement des cannes de tournesol (parcelles infectées) pour limiter la contamination
9. Efficace mais non rentable sur tiges, inefficace sur attaques au collet (les plus nuisibles)
10. Eviter semis trop précoces et excès d'azote
11. Quelques adventices difficiles à détruire chimiquement (abutilon, bident, prêle, xanthium)
12. Augmenter densité de peuplement, réduire l'écartement entre rangs
13. Résidus en surface (non labour) favorisent les attaques de limaces

Dans le cas du **tournesol**, ce sont les maladies cryptogamiques et les mauvaises herbes qui constituent le facteur potentiel le plus fort de perte de récolte. Le tournesol est cultivé sur 0,69 Mha, soit environ 2% de la SAU (sources : SCEES 2003). En 2001, le désherbage a concerné la quasi totalité des surfaces, avec en moyenne 2 traitements. Moins de 10% des cultures ont reçu un insecticide ou un fongicide, mais au moins un traitement anti-limace a été appliqué sur près de 60% des surfaces (Agreste, 2004). Le désherbage mécanique (binage) est assez pratiqué (un peu moins de 30% des situations enquêtées, Agreste, 2004). En moyenne, moins de 10% des parcelles ont reçu un traitement fongicide en 2001 (Agreste, 2004). La protection contre le phomopsis, le mildiou, et dans une moindre mesure contre le sclérotinia, repose essentiellement sur l'utilisation de variétés tolérantes (Tableau 4.3-17). Comme pour le colza, un agent biologique est homologué pour lutter contre le sclérotinia (*Coniothyrium minitans*, commercialisé sous le nom de Contans®).

4.3.2.2. Cas de l'agriculture biologique

Principes généraux

En agriculture biologique, les performances techniques des systèmes de grandes cultures reposent avant tout sur la prévention des épidémies (au sens large, incluant tous les bio-agresseurs), le contrôle des adventices et l'équilibre azoté du système, notamment par l'utilisation de plantes fixatrices et/ou d'engrais verts (Askegaard *et al*, 1999). L'absence de moyens de protection par voie chimique (par l'utilisation de produits de synthèse) et/ou l'utilisation de productions génétiquement modifiées incite au développement de solutions agronomiques variées. La concurrence des adventices et les déficits azotés apparaissent comme les deux facteurs limitant majeurs en production céréalière, induisant une limitation des rendements (réduction des rendements accessibles) de 15 à 60% (Taylor *et al*, 2000, Barberi, 2002). De même, le développement important des grandes cultures biologiques conduit à s'intéresser aux moyens de contrôle naturels des maladies et ravageurs (van Bruggen, 1995).

En agriculture biologique, la protection des cultures est la résultante d'une combinaison judicieuse d'un ensemble de pratiques prophylactiques (limitation du risque d'apparition réduction du risque d'épidémie, *P*) et de contrôle des bio-agresseurs (utilisation de moyens directs pour réduire l'amplitude du risque en termes de pertes de récolte, *M*).

Les méthodes prophylactiques

Diversité d'espèces cultivées et rôle de la rotation

La diversité des espèces au sein de la rotation est un moyen efficace pour réduire les populations d'adventices (Bond et Grundy, 2001) et la présence et/ou la nuisibilité des bio-agresseurs (Finckh et Wolfe, 1998), tout en garantissant un maintien ou une amélioration de la productivité. La diversité végétale est particulièrement illustrée dans le cas de la gestion des adventices et des pathogènes végétaux.

Le contrôle des adventices est amélioré en alternant des cultures dont le cycle cultural occupe une position variable dans le calendrier (en particulier espèces semées en hiver et au printemps), ce qui contribue à diversifier leurs périodes de croissance (développement végétatif et croissance racinaire). De plus, l'alternance de différentes espèces conduit à une diversification des techniques d'implantation et de désherbage, qui contribue également à réduire les infestations de mauvaises herbes (Liebman et Davis, 2000). La diminution du potentiel semencier peut être assurée grâce à l'implantation de cultures fourragères (Davies *et al*, 1997). A l'inverse, la faible part de cultures fourragères (peu rémunératrices) en rotation céréalière conduit à une augmentation des adventices annuelles et à l'apparition d'espèces dominantes (l'augmentation de la densité d'une espèce induit une limitation de la diversité des autres espèces) difficiles à maîtriser (David, 2002). Les cultures à faible taux de couverture en phase végétative (comme le tournesol) ne peuvent assurer un contrôle efficace des adventices par ombrage. Dans des conditions d'alimentation hydrique satisfaisante, l'introduction de cultures intercalaires ou de semis sous couvert permet de couvrir l'inter-rang et d'accroître la compétitivité vis-à-vis des mauvaises herbes (Jobin et Douville, 1993).

La diversité des cultures au sein de la rotation permet également de rompre le cycle de champignons pathogènes responsables de certaines maladies du pied (piétin-verse et piétin échaudage des céréales, par exemple ; Colbach *et al.*, 1996) mais aussi foliaires (slérotinia par exemple). A l'inverse, la spécialisation des systèmes céréaliers biologiques, accompagnée d'une fréquence plus élevée de blé dans la rotation (culture dont le différentiel de prix par rapport au blé conventionnel est le plus important), augmente par conséquent le risque de contamination par les agents pathogènes. Une disposition spatiale raisonnée des cultures dans l'assolement permet également de limiter la transmission des maladies d'une culture à l'autre (par exemple, le risque de transmission de l'oïdium de l'orge d'hiver au blé). Par ailleurs, la présence de cultures variées dans le paysage conduit à une plus forte présence des ennemis naturels (insectes, les champignons, les bactéries et virus) des bio-agresseurs (Stacey, 2003).

Choix du cultivar et associations variétales

Ces choix ont des conséquences sur la gestion des adventices et des pathogènes. Certaines caractéristiques physiologiques telles que la dynamique de levée, la vitesse et la précocité de montaison, le port étalé des feuilles et la hauteur de paille permettent d'améliorer la compétitivité des cultivars vis-à-vis des adventices. Selon Rasmussen *et al.* (1999), la dynamique de levée et la croissance végétative initiale (avant stade tallage) sont deux critères à privilégier dans la sélection variétale à destination de l'agriculture biologique. De même, les espèces à feuilles larges et étalées semblent assurer une plus forte couverture au sol durant la période végétative (Eisele et Köpke, 1997). Le choix de variétés multirésistantes ainsi que les associations variétales (Finckh *et al.*, 2001) sont les techniques les plus efficaces fréquemment utilisées (12% de la sole céréalière biologique Française est semée en associations) pour limiter les maladies du feuillage (rouilles, oïdium, septoriose). En effet, les associations de variétés ayant des résistances complémentaires permettent de limiter la pression des maladies foliaire par un triple effet de barrière, de dilution de l'inoculum et d'induction de réactions de défense (Wolfe, 1985).

Les méthodes classiques de sélection des variétés ont permis, dans certains cas, d'obtenir des variétés résistantes à certains insectes ravageurs (par exemple, cas de la résistance aux sauterelles : Hinks et Olfert, 1992).

Cependant actuellement en France, les producteurs biologiques sont dépendants des génotypes sélectionnés en agriculture conventionnelle qui ne répondent pas complètement aux exigences de la filière et aux conditions de production spécifiques de l'agriculture biologique. Ainsi, comme le soulignent Lammerts van Bueren *et al.* (2002), il existe un réel besoin de sélection variétale adaptée aux conditions limitantes sous contraintes multiples, actuellement développée dans certains pays (Allemagne, Autriche, Suisse).

Associations interspécifiques

Les associations céréales – légumineuses à graines, fréquentes en agriculture biologique, permettent d'assurer un meilleur contrôle des mauvaises herbes que dans les cultures pures, particulièrement par rapport à la légumineuse pure (Bulson *et al.*, 1997 ; Hauugaard-Nielsen, 2001) du fait de la compétition vis à vis de la lumière : la densité globale de peuplement plus élevée et l'architecture complémentaire de la céréale et de la légumineuse permettent une fermeture plus rapide du couvert. La plus grande compétitivité vis-à-vis des adventices peut s'expliquer aussi par une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote par l'association qui limiterait alors la quantité de cette ressource pour les adventices. En jouant le même rôle que les associations variétales, les associations d'espèces permettent également de réduire les niveaux de maladies aériennes (Corre-Hellou, 2004).

Travail du sol et fertilisation

Le maintien de conditions favorables de croissance et l'absence de stress assurent une augmentation des défenses naturelles de la plante contre les bio-agresseurs (Tamis et Van den Brink, 1999). L'augmentation de la fertilité du sol, notamment grâce à des apports en matières organiques et un bon raisonnement des techniques culturales conduit à un meilleur contrôle des maladies et ravageurs (Altieri, 1995).

Selon certains auteurs (Hakansson, 1998; Rodriguez, 1999; Kouwenhoven, 2002), le labour est une pratique efficace pour contrôler l'émergence de certaines espèces annuelles (cas de *Alchemilla* sp., *Capsicum* sp.). A l'inverse, chaque intervention mécanique (labour, outils de reprise) provoque de nouvelles émergences (cas de *Chenopodium* sp. et *Papaver rhoeas*) en positionnant un nouveau lot de semences en surface et en modifiant les conditions ambiantes de la couche arable (réhumectation, modification de la structure interne). Selon Leblanc et Cloutier (1993), la technique du faux semis, fréquemment utilisée en agriculture biologique, permet une réduction de 67% du stock d'adventices annuelles automnales. Toutefois, il convient d'effectuer ces travaux dans des conditions de ressuyage optimal. En effet, la présence de conditions dégradées dans le sol en système céréalier favorise l'apparition d'espèces vivaces (ex. *Cirsium arvense*). Les techniques simplifiées sans labour semblent favoriser la prédominance de certaines espèces vivaces (ex. *Cirsium arvense*), ainsi que la concentration du potentiel semencier dans les horizons de surface (Peigné *et al.*, 2005).

En agriculture biologique, l'absence de produits systémiques pour lutter contre les adventices peut être compensée par des interventions mécaniques régulières, par des outils spécifiques (herse étrille, houe rotative, etc.). Cependant, le passage répété des outils de travail du sol, de désherbage et d'épandage conduit, en conditions pédo-climatiques défavorables, à la dégradation de l'état physique et biologique des sols (David et Gautronneau, 2002).

Le labour (20-30 cm de profondeur) semble intervenir sur le contrôle des pathogènes du sol (Katan, 2000), en enfouissant l'inoculum dans des couches de sol profondes. Lors d'application de techniques culturales simplifiées, les résidus de cultures maintenus au sol conduisent à un enrichissement minéral induisant une augmentation des niveaux de maladies et favorise certains ravageurs (principalement les limaces). A l'inverse, l'augmentation de l'activité biologique peut induire une limitation pathogènes du sol (Sturz *et al.*, 1997).

Les méthodes de lutte

Les pratiques de désherbage

Ces méthodes (mécanique – herse ou bineuse - ou thermique) permettent un contrôle des adventices sur l'année, notamment suite à l'amélioration des outils de désherbage et à la détermination des périodes et conditions optimales de passage. De nombreux travaux ont porté sur le développement des techniques de désherbage (Rasmussen et Ascard, 1995; Bond et Grundy, 2001; Barberi, 2002) mettant en évidence le rôle déterminant des conditions d'application (Welsh *et al.*, 1997, 1999 ; Bond et Lennartsson, 1999) sur la réussite de la technique. Le contrôle des espèces vivaces (*Cirsium arvense*, *Agropyron repens*) et/ou de certaines graminées (*Avena fatua*) reste le problème majeur en agriculture biologique, notamment dans le cas de rotations céréalières courtes. Les graminées à levées échelonnées et à germination profonde sont très peu affectées par la herse étrille. Leur contrôle ne peut être assuré qu'avec un blé biné semé à grand écartement (30-40cm). Les vivaces sont quant à elles maîtrisées de façon préventive (cf. ci-dessus). Ainsi, la maîtrise des adventices en système céréalier est perçue par les agriculteurs comme l'obstacle le plus important à la conversion à l'agriculture biologique (Beveridge et Naylor, 1999), comme le confirme d'ailleurs un diagnostic réalisé en parcelles agricoles (David *et al.*, 2005).

Le contrôle des ravageurs et des maladies cryptogamiques par l'utilisation de produits naturels

Concernant le contrôle des insectes ravageurs, la réglementation européenne autorise l'utilisation de substances d'origine végétale et d'extraits de plantes, dont les principaux sont la roténone et les pyréthrinés (cf. Tableau 4.3-18) afin d'agir sur certains insectes nuisibles (pucerons, chenilles). Leur manque de sélectivité rend leur utilisation dangereuse pour les populations auxiliaires (ex. : coccinelles, hyménoptère *Edovum puttleri*). En outre, leur efficacité sur les pucerons est largement mise en cause (Taupier-Letage, 2001). Une expertise est actuellement en cours pour évaluer les risques encourus lors de la pulvérisation de ce type de produits. L'usage de répulsifs et/ou fongicides d'origine naturelle (ex. : purin d'ortie) reste rare en production céréalière ; les pulvérisations doivent être fréquentes pour une efficacité limitée.

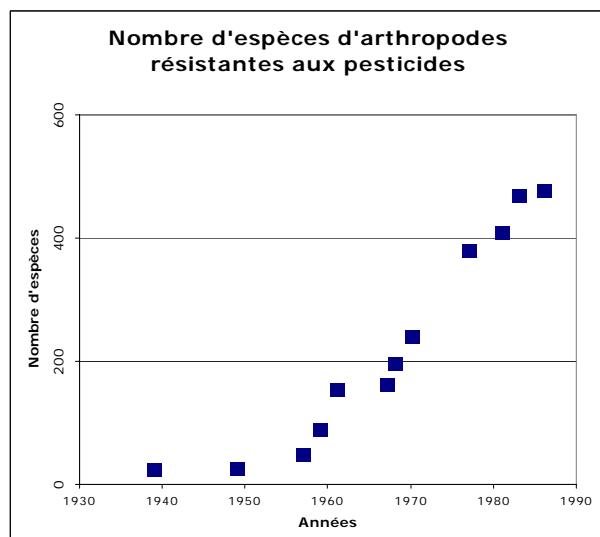
Concernant le contrôle des maladies, l'utilisation de cuivre et d'huiles minérales a été interdite depuis avril 2002 compte tenu du risque de toxicité survenue sur certaines productions (ex. vigne). Des programmes de recherche se développent donc sur les alternatives, telles que les extraits de plantes et l'utilisation du cuivre afin de garantir la lutte contre certaines maladies spécifiques (le mildiou de la pomme de terre et/ou de la vigne) (Monnet, 2001).

| Substances |
|---|
| Acides naturels (ex : vinaigre) |
| Préparations d'algues |
| Préparations animales et huiles |
| Préparations bactériennes (p.ex., <i>Bacillus thuringiensis</i>) |
| Cire d'abeilles |
| Hydroxyde de calcium |
| Dioxyde de Carbone |
| Chitine nématocide (origine naturelle) |
| Chlorure de chaux |
| Marc de café |
| Sels de cuivre (ex : sulfate, hydroxyde, oxychlorure, octanoate) |
| Ethanol (alcool éthylique) |
| Préparations fongiques |
| Gélatine |
| Préparations Homéopathique |
| Insectes (stérilisés) |
| Lécithine |
| Souffre de chaux (calcium polysulfure) |
| Neem (<i>Azadirachta indica</i>) |
| Parasites, prédateurs et insectes stérilisés |
| Phéromones |
| Huiles végétales |
| Extraits de plantes |
| Bicarbonate de potassium |
| Permanganate de potassium |
| Propolis |
| Pyrethre (<i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i>) |
| Quassia (<i>Quassia amara</i>) |
| Chaux vive |
| Roténone (<i>Derris elliptica</i> , <i>Lonchocarpus</i> spp.) |
| Ryania (<i>Ryania spaciola</i>) |
| Sabadilla |
| Sel de mer et eau salée |
| Silicates (ex: silicate de sodium, quartz) |
| Savon (doux) |
| Bicarbonate de sodium (soda) |
| Thé de tabac |
| Préparations virales (p. ex., <i>granulosis virus</i>) |

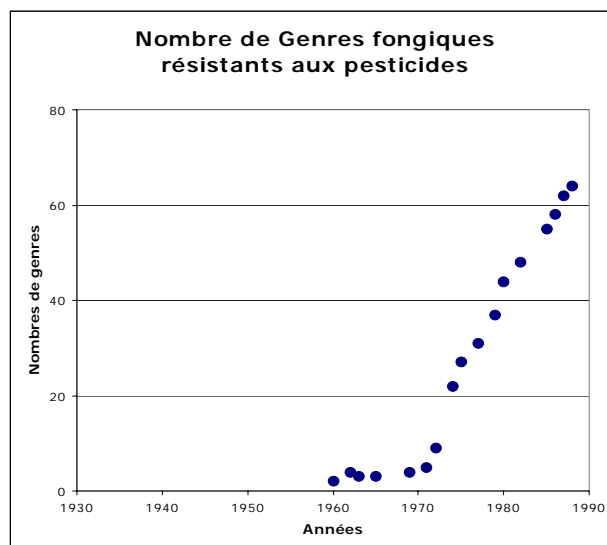
Tableau 4.3-18. Liste des produits autorisés pour la production végétale biologique
Issu de CODEX ALIMENTARIUS guidelines for the production, marketing and labeling of organically produced foods

4.3.2.3. Durabilité de l'efficacité des méthodes de lutte

La question de la durabilité des méthodes de contrôle des bio-agresseurs concerne l'ensemble des instruments opposant à un bio-agresseur un obstacle total à sa dynamique. Ces instruments incluent donc certaines résistances végétales aux bio-agresseurs (les résistances complètes) et la plupart des pesticides (herbicides, nématocides, fongicides, insecticides, antibiotiques). L'histoire de l'agriculture mondiale est riche d'exemples où l'emploi de tels instruments se traduit initialement par des résultats prometteurs, ou des succès importants, mais qui sont temporaires, et, à échéance variable, des échecs. La figure 4.3-1 illustre le problème dans le cas des insecticides et des fongicides.



(Source : Delp, 1988)



(les genres présentant des résistances multiples sont répétés)
Source : Delp, 1988)

Figure 4.3-1. Evolutions mondiales des nombres d'espèces d'insectes résistants aux insecticides et des nombre de genres fongiques résistants aux fongicides

La durabilité de l'efficacité des méthodes de lutte contre les bio-agresseurs est une question à la fois générique et importante. L'adaptation des populations à des méthodes de contrôle est bien documentée pour la lutte chimique contre les mauvaises herbes (Valverde et Itoh, 2001; Vaughn, 2003), les champignons et les bactéries (Ogawa *et al.*, 1977 ; anonyme, 2004), et les insectes (Denholm *et al.*, 1999 ; Elzen et Hardee, 2003). En France notamment, des résistances à différents fongicides sont apparues à des degrés divers dans de nombreuses populations de champignons phytopathogènes : *Tapesia yallundae* (principal agent causal du piétin-verse des céréales)/triazoles, prochloraz ; *Blumeria graminis* et *B. hordei* (respectivement responsable de l'oïdium du blé et de l'orge)/triazoles, morpholines-pipéridines-spirocétalamines, strobilurines, cyprodinil, quinoxyfen ; *Septoria tritici* (agent responsable de la septoriose du blé)/strobilurines, triazoles ; *Helminthosporium teres* (agent causal de l'Helminthosporiose de l'orge)/triazoles ; *Rhynchosporium orthosporum* (agent causal de la rhynchosporium de l'orge)/triazoles (IDM, inhibiteurs de la synthèse des stéroïdes) (Leroux, 2003 ; Anonyme, 2004) ; *Sclerotinia sclerotiorum* (agent causal de la sclérotiniose du colza, tournesol, pois, haricot, féverole...)/ benzimidazoles (Anonyme, 2003). De même, les cultures d'OGM contrôlant différents insectes peuvent également conduire à l'apparition de résistances chez les populations visées (Raman *et al.*, 1994 ; Laxminarayan and Simpson, 2002). Enfin, les résistances obtenues par amélioration génétique peuvent également perdre leur efficacité, parfois en quelques années, dans le cas de champignons (McDonald et Linde, 2002 ; Parlevliet, 2002), de bactéries (Parlevliet, 2002), ou de virus (Parlevliet, 2002 ; García-Arenal et McDonald, 2003). Il apparaît donc indispensable de développer des stratégies pour (1) prévenir les accidents que provoquent les contournements de ces méthodes de contrôle par les populations de bio-agresseurs, et (2) préserver l'efficacité des méthodes de lutte contre les organismes phytopathogènes.

En ce qui concerne l'apparition de résistance à des familles de molécules utilisées pour la protection phytosanitaire des cultures, les recommandations portent souvent sur une limitation de la pression de sélection exercée par alternance et/ou mélange des molécules (Leroux, 2003 ; Anonyme, 2004). De manière similaire, pour les résistances variétales, outre les stratégies au niveau de la construction du matériel génétique (tel le pyramidage, McDonald et Linde, 2002), trois grands types de stratégies ont été proposés pour préserver l'efficacité des résistances variétales aux organismes phytopathogènes. Ces stratégies consistent généralement à i) adapter la proportion des variétés résistantes dans une région donnée, sans tenir compte de la répartition des variétés (Kiyosawa, 1982; Shi-Mai, 1991 ; van den Bosch et Gilligan, 2003), ii) utiliser des associations variétales (Browning, 1974; Wolfe, 1985;

Lannou et Mundt, 1997; Mundt, 2002), ou iii) alterner des résistances dans le temps et l'espace (Kiyosawa, 1982; Holt et Chancellor, 1999).

Comme le montrent ces exemples, toute méthode de contrôle exerçant une forte pression de sélection sur les populations visées (telle la lutte chimique ou l'utilisation de résistances spécifiques totales) est généralement amenée à perdre de son efficacité au fur et à mesure que son usage se généralise. Cependant, la combinaison de méthodes de contrôle génétiques, culturales, biologiques, physiques, et chimiques, permettrait de préserver l'efficacité d'éléments de contrôles certes efficaces mais vulnérables compte tenu de la pression de sélection qu'ils exercent. Ceci a notamment été démontré expérimentalement dans le cas de la gestion de la résistance du vulpin (*Alopecurus myosuroides*) aux aryloxyphenoxypropionates (fops) en adaptant l'ensemble du système de culture (Chauvel *et al.*, 2001).

4.3.3. Les alternatives aux pratiques actuelles en grandes cultures

4.3.3.1. Raisonnement de la lutte chimique

Nous envisageons ici la lutte chimique contre les adventices, en tant qu'exemple clé de bio-agresseurs des grandes cultures. La mise en oeuvre de seuils (voir la partie 4.1, où la notion de seuil, sa définition, et les limites de l'utilisation pratique des seuils sont discutées) et de périodes d'intervention basées sur l'observation de la densité des adventices ou de leur recouvrement dans la culture est une voie privilégiée de raisonnement du désherbage de post-levée en grande culture (Cussans *et al.*, 1986). Elle doit permettre d'éviter le désherbage en deçà de certaines densités et en dehors de certaines périodes critiques.

De nombreuses valeurs expérimentales de seuils de nuisibilité (assez cohérentes quoique entachées d'une certaine variabilité entre sites et années, surtout en blé d'hiver et pour les principales mauvaises herbes) permettent de constituer déjà un référentiel adéquat pour l'aide à la décision (Wilson, 1986 ; Zanin *et al.*, 1993). Cependant, ces seuils n'ont qu'une portée limitée, car la période de levée de l'adventice modifie beaucoup l'issue de la concurrence.

Des expérimentations ont été mises en place pour tester l'intérêt de stratégies annuelles de désherbage basées sur les seuils de nuisibilité économiques. Marshall (1987) en Angleterre et Wahmhoff (1990) en Allemagne concluent à l'intérêt économique d'une approche utilisant les seuils de nuisibilité, par rapport à la pratique habituelle des agriculteurs, basée sur les traitements d'assurance. Par contre, la pratique des seuils de nuisibilité en céréales, amenant certaines années à des impasses de traitement, peut conduire, après quelques années, à un plus fort salissement que la pratique systématique d'un désherbage chimique à dose réduite en céréales (Davies *et al.*, 1993).

Par ailleurs, la mise en pratique des seuils de nuisibilité pose au moins deux problèmes de décision : (1) le temps passé à estimer les populations, surtout aux faibles densités, peut être rédhibitoire. L'estimation de la densité d'une espèce, proche de celle du seuil de nuisibilité, nécessite 18 stations par hectare pour une précision de 30%, ce qui n'est pas compatible avec l'emploi du temps d'un agriculteur (Marshall, 1987). La prise de décision doit découler d'un indicateur plus global (par exemple, taux de recouvrement adventice), ce qui relativise la précision exigée sur le seuil de référence ; (2) la densité moyenne ne permet pas de rendre compte des distributions agrégées (taches) qui caractérisent la plupart des infestations.

Le concept de seuil de nuisibilité économique est au cœur de nombreux modèles bio-économiques d'aide à la décision (surtout aux USA) bien que ce concept se soit moins facilement imposé que pour les insectes et que l'usage des modèles pose toujours de nombreux problèmes pratiques de mise en oeuvre (Wilkerson *et al.*, 2002).

Si l'utilité des seuils de nuisibilité est reconnue pour des décisions annuelles, il est plus difficile d'en apprécier les coûts et bénéfices sur le long terme. Munier-Jolain *et al.* (2002) ne mettent pas en évidence de différences de fréquence de traitement sur le long terme pour des seuils entre 0,01 et 100 plantes par m², relativisant ainsi la précision de la valeur seuil. La notion de seuil de nuisibilité à long terme (plus faible que l'annuel) a été introduite afin d'intégrer le risque de production semencière (Cussans *et al.*, 1986). Un seuil de sécurité peut être défini pour inclure le risque de mauvaise

efficacité des herbicides. Dans la pratique, il est probable que l'agriculteur appliquera un seuil visuel subjectif, dépendant de considérations "esthétiques" ou d'un souci de maintien de la fertilité. En céréales, il est justifié d'intervenir en présence de gaillet ou de folle-avoine d'automne, car leurs seuils de nuisibilité sont bas (1-5 plantes par m²) et leur démographie explosive, d'autant plus que la succession est chargée en cultures d'hiver et le travail simplifié. Par contre, en présence de dicotylédones basses (seuil de 50-150 plantes par m²), plutôt qu'un désherbage d'entretien systématique, on peut envisager des impasses dans des conditions bien définies (succession peu chargée en cultures d'hiver, alternance des modes de préparation, levées tardives) sans risque pour les cultures suivantes (Debaeke, 1993).

La construction de programmes de désherbage adaptés au type de sol, à la flore présente (densité, composition, distribution spatiale) voire à l'objectif de production s'est développée également. Des tableaux de bord pour le raisonnement du désherbage du blé sont proposés pour les principales régions françaises et l'on note un progrès dans la fourniture d'éléments de raisonnement pour l'agriculteur, en particulier la prise en compte des jours disponibles pour désherber (Massé et Jouy, 1994).

En blé d'hiver, l'utilisation de faibles doses d'herbicides sur adventices peu développées permet d'obtenir des rendements voisins de ceux que l'on obtient avec les pratiques de désherbage habituelles. Salonen (1992) montre ainsi que la diminution par 2 des doses recommandées en céréales pour certains herbicides anti-dicotylédones diminue l'efficacité du traitement de 5 à 15%. Par contre, les risques de salissement résiduel à la récolte sont plus importants, avec des conséquences négatives sur l'humidité du grain ou le temps de récolte. L'avancée des dates de traitement (post-levée précoce en blé d'hiver), calée sur le stade de la céréale, permet de réduire les doses (jeunes adventices) et de détruire les espèces les plus compétitives mais peut justifier d'un traitement complémentaire dans le cas de levées plus tardives (type de flore lié à l'histoire culturale, conditions climatiques). A plus long terme, le risque d'apparition de résistances est-il augmenté par rapport à des traitements moins fréquents mais à dose plus élevée ? Selon Beckie et Kirkland (2003), la proportion d'individus de folle-avoine résistants aux traitements de post-levée diminue dans la population semencière dès lors qu'on diminue les doses herbicides d'un tiers.

Le développement des possibilités de traitement à pleine dose sur le rang (où la compétition est la plus forte) et de binage mécanique de l'inter-rang permet de diminuer les doses d'herbicides à l'hectare tout en assurant un désherbage efficace des cultures à large écartement (maïs, tournesol). De bons résultats ont été obtenus sur maïs en France, aux USA et au Canada (Leblanc *et al.*, 1995). La limitation n'est probablement pas technologique mais plutôt économique (investissements) ou liée à l'organisation du travail (temps de travail supérieur dès lors qu'on inclut des interventions mécaniques). L'expérience menée en fermes expérimentales aux Pays-Bas (Post et Wijnands, 1993) montre que si l'on réduit par 2 ou 3 les coûts de désherbage directs en conduite intégrée, on double, dans certains cas les passages en végétation, ce qui peut poser d'autres problèmes en terme de structure du sol, de coût énergétique, et de temps de travail.

Le développement technologique associé à l'agriculture de précision permet d'envisager des solutions basées sur la reconnaissance automatisée des adventices et un traitement de post-levée extrêmement localisé. Selon Gerhards et Christensen (2003), les quantités d'herbicides utilisées pendant 4 ans sur 4 cultures (maïs, betterave, blé, orge) ont diminué de 10 à 90%.

Ces techniques obligeront à bien préciser les règles de décision pour l'application des traitements. Ces innovations ne dépassent pas encore le stade de la recherche.

4.3.3.2. Apports de l'amélioration génétique

C'est à l'encontre des maladies infectieuses que la sélection variétale a porté le plus de fruits. Parallèlement à la création de variétés résistantes ou tolérantes aux bio-agresseurs, la recherche s'intéresse à la gestion de ces résistances afin d'en préserver la durabilité autant que possible.

La durabilité d'une résistance dépend :

- (1) des gènes impliqués et de leur fonction,
- (2) de la capacité d'adaptation de la population pathogène, et
- (3) de la façon dont les résistances sont utilisées au champ, c'est-à-dire de la manière dont les gènes de résistance sont déployés dans le temps (rotations des résistances au cours des cycles successifs) et dans

l'espace. Ces trois domaines font l'objet de recherches très actives en France et dans le monde; elles font écho à des questions très actuelles de biologie à l'échelle des populations.

La culture sur de grandes surfaces d'un petit nombre de variétés faisant appel à des gènes de résistance très spécifiques est susceptible de conduire en quelques années à la sélection de nouvelles races de parasites capables de les surmonter. Un exemple récent est le contournement du gène de résistance Yr17 du blé à la rouille jaune, très utilisé en sélection, contourné en 3 à 5 ans, et qui a été à l'origine de graves épidémies en Europe de l'Ouest ces dernières années (Bayles *et al.*, 2000). De même, l'efficacité du gène de résistance spécifique Rlm1 dans le cas du phoma du colza, a fortement diminué au fur et à mesure du déploiement de la résistance dans les principales zones de production françaises (Rouxel *et al.*, 2003). Un autre exemple concerne le contournement régulier de la résistance verticale au mildiou du tournesol par l'apparition de nouvelles races physiologiques (Tourvieille *et al.* 2004). Tous ces exemples constituent des illustrations du "*boom-and-bust cycle*" largement décrit dans la littérature (Zadoks et Schein, 1979).

Ces situations de confrontation gène-pour-gène ne sont pas systématiques. En réalité, un grand nombre de résistances s'expriment sur un mode incomplet, c'est-à-dire qu'elles n'empêchant pas l'établissement et le développement de populations de bio-agresseurs, mais qu'elles sont suffisantes pour que les épidémies ne se traduisent pas par des dommages importants. Autant la sélection tournée exclusivement vers des résistances incomplètes est difficile et coûteuse (Zadoks et Schein, 1979, Parlevliet, 1979), autant la sélection de variété incluant, parmi d'autres traits, des éléments d'une résistance partielle, sont fréquents. De ce fait, la résistance partielle à un ensemble de bio-agresseur est un caractère probablement très répandu, et dont les bénéfiques sont souvent très mal reconnus, alors que paradoxalement, ils sont sans doute très importants. Le cas des blés rustiques (cf. ci-dessous; Rolland, 2003) en est une claire illustration.

Les contournements de résistance sont d'abord dus au caractère complet des résistances exprimées. Une première démarche concerne le point 1 ci-dessus, et débouche sur la recherche de résistances intrinsèquement durables du fait de leur mode d'expression. Certains traits de résistance de l'hôte, qui ne correspondent pas nécessairement à un gène ou un locus particulier du génome, mais à plusieurs, se traduisent par des résistances partielles, ou incomplètes, qui souvent s'avèrent plus stables, parce que plus difficilement contournables par la biologie des populations de bio-agresseurs (Parlevliet, 1979). Une illustration récente de cette logique est constituée par l'utilisation de variétés rustiques de blé d'hiver présentant différents niveaux de résistances incomplètes, et qui, dans le cadre d'itinéraire à faible niveaux d'investissement (et à faible niveaux d'intrants), génèrent des rendements acceptables, des performances en qualité au moins égales aux variétés conventionnelles menées à haut niveaux d'intrants (dont chimiques), et des marges économiques généralement meilleures que celles associées à des itinéraires techniques intensifs conventionnels (Rolland *et al.*, 2003).

Le contournement d'une résistance est ensuite dû à une faible diversité génétique — ou, plus exactement, à une faible diversité des résistances (complètes) déployées. Une approche consiste à associer dans une même parcelle des variétés à bonne potentialités compatibles sur le plan agronomique (port, précocité) et technologique (qualité du grain) mais différant par leurs sources de résistance. L'idée n'est pas nouvelle (Jensen, 1952) mais son application est encore restreinte en France. Cette solution a été préférée à la culture de variétés en mosaïques et à la sélection d'isolignées ne différant que par les gènes de résistance car le fond génétique est plus diversifié par le choix de variétés (Wolfe, 1985 ; Mundt, 2002). Les associations variétales sont destinés à ralentir la vitesse des épidémies de maladies foliaires polycycliques (sur blé : rouilles brune et jaune, septorioses) et n'ont pas d'effets connus sur les maladies d'origine tellurique (piétin-verse) (de Vallavieille-Pope *et al.*, 1991 ; Saur et Mille, 1997). L'association 1/3 de plantes sensibles et 2/3 de résistantes (associant 3-5 variétés) (1) augmente l'interception de propagules par des plantes non sensibles, (2) réduit la probabilité d'un propagule d'entrer en contact avec un hôte sensible, et (3) génère une résistance induite (ou prémunition) par le contact de plantes sensibles avec des spores avirulentes.

Les associations variétales de blé sont utilisées à grande échelle en Suisse, au Danemark, en Allemagne, en Pologne et aux USA dans le cadre d'une agriculture conventionnelle et les débouchés peuvent concerner la panification ou la malterie. Les arguments sont autant économiques qu'environnementaux. Dans le contexte français, le débouché immédiat, actuel, des variétés en

association est l'alimentation du bétail car les livraisons pour la panification imposent la traçabilité à laquelle l'utilisation de variétés pures est actuellement associée.

Il a été montré que ces associations variétales (céréales pour l'essentiel) peuvent être composées à faible coût (ferme, coopérative) et qu'elles permettent autant un bon contrôle des maladies qu'une stabilité du rendement même dans les situations à faibles risques parasitaires (Finckh et Wolfe, 1998). Des gains de rendement sont généralement observés par les associations dès lors que les épidémies sont plus fortes (orge de printemps au Danemark : +1-7% par rapport aux variétés cultivées pures dans les essais non traités : 20 ans - 230 expérimentations ; 10% de la sole ; 50 mélanges autorisés). Des économies de fongicides sont également attendues : réduction de 1 à 2 traitements pour des rendements similaires (Mille et de Vallavieille-Pope, 2001), soit la possibilité d'une culture exempte d'applications fongicides dans beaucoup de contextes. La diversité au sein d'une association permet également une répartition des risques agronomiques et pathologiques (gel, qualité, stabilité du rendement) ce qui est un atout pour les systèmes à bas niveaux d'intrants. La durabilité de la résistance d'ensemble d'une association variétale reste encore peu étudiée et difficile à prévoir. Il semblerait cependant que le maintien d'une résistance d'ensemble soit meilleur dans le cas d'une association. La composition des mélanges peut être ajustée en fonction de l'évolution des populations parasites.

Ces exemples montrent clairement que les mélanges variétaux pourraient être utilisés à grande échelle (et étendus à d'autres cultures que les céréales) mais qu'il reste à définir les mélanges (aptitude à l'association) et la durabilité des résistances employées. Des tentatives ont été lancées en France en partenariat avec des groupements d'agriculteurs, des Chambres d'Agriculture et des meuniers (cf. Programme Pesticides - MEDD). D'autres bio-agresseurs comme les nématodes pourraient être contrôlés selon ce même principe.

Il n'apparaît pas, en France tout au moins, de sélection explicite pour des critères de compétitivité vis-à-vis des adventices (sélection en parcelles désherbées, difficulté de disposer de populations adventices homogènes même semées, créneau plus étroit que pour les maladies). Deux types de critères ont été pris en compte pour la sélection du riz en Asie du Sud et du Sud-Est au cours des 40 dernières années : des idéotypes à morphologie permettant une plus grande compétitivité (vis-à-vis de la lumière) à l'encontre des adventices, et, beaucoup plus récemment, des effets d'allélopathie. Des travaux récents ont néanmoins été menés en France pour évaluer les possibilités de suppression des adventices par le choix variétal (blé, pois) en particulier en vue de l'agriculture biologique. Les effets variétaux peuvent être très marqués en céréales (Christensen, 1995 ; Debaeke *et al.*, 1997). Diverses caractéristiques ont été mises en évidence à cette occasion, pour les céréales à paille : précocité de montaison, hauteur de tige, port des feuilles, aptitude au tallage, notamment. Les catalogues variétaux ne fournissent pas toujours ces critères, qui pourtant permettraient de raisonner plus globalement le choix variétal.

4.3.3.3. Les méthodes de lutte biologique

Les différents développements qui ont eu lieu jusqu'à présent en lutte biologique ont conduit à des résultats parfois satisfaisants. Par exemple, une société française, Biotop, en partenariat avec l'INRA a développé et commercialise des méthodes de lutte biologique contre des insectes nuisibles qui sont couramment utilisés en France, en Allemagne et en Suisse. En 2001, près de 15% des surfaces de maïs traitées contre la pyrale (de l'ordre de 500 000 ha) ont été protégées par des trichogrammes (*Trichogramma brassicae*), micro-hyménoptères parasitoïdes d'*Ostrinia nubilalis* (Frandon *et al.*, 2002). Cependant, la lutte biologique n'est pas la panacée susceptible de protéger l'ensemble des cultures contre tous leurs ennemis (Riba et Silvy, 1993). Sur 600 projets portant sur des lâchers de prédateurs ou de parasitoïdes, seulement 16 % ont permis de réduire significativement la taille des populations visées de manière à remplacer les insecticides conventionnels (Myers *et al.*, 1989). De même, Ferron (2000) rapporte que seulement 421 sur 4769 introductions d'organismes auxiliaires contre des insectes ravageurs se sont révélées économiquement satisfaisantes et que ce taux était de 73 sur 692 dans le cas des mauvaises herbes (d'après Greathead, 1995). La lutte biologique contre les maladies des plantes n'en est encore qu'au stade de la recherche le plus souvent et les produits commercialisés sont rares (Alabouvette *et al.*, 2003). La difficulté à mettre au point ces techniques

s'explique certainement par la complexité de l'écologie des systèmes fongiques (Zadoks, 1993b). Au-delà du parasitisme et de la prédation, les champignons peuvent mettre en œuvre des mécanismes d'antibiose et sont en compétition pour les micro-nutriments. En France, une seule spécialité est disponible pour lutter contre les maladies dues à des champignons à sclérotés (*Coniothyrium minitans*, commercialisée sous le nom de Contans) (Penaud, 2004).

Les raisons de la faible utilisation des méthodes de lutte biologique en grandes cultures sont multiples. Tout d'abord, il y a bien sûr la faible disponibilité des méthodes disponibles, qui concernent essentiellement la lutte contre les arthropodes. Si certaines méthodes se sont révélées prometteuses au niveau de l'expérimentation au laboratoire, ou même au champ, il faut que l'agent biologique puisse être produit en grande quantité et à faible coût, de manière à permettre sa commercialisation. De plus, même si une méthode de lutte biologique se révèle prometteuse lors d'expérimentations, l'ensemble du système de culture n'est quasiment jamais pris en compte lors de la phase de développement. Or, les conditions environnementales, sous l'influence des pratiques agricoles, influencent fortement le comportement des auxiliaires (Zadoks, 1993b). L'étude de cette interaction est nécessaire et devrait faire l'objet de recherches spécifiques pour permettre un développement plus efficace de méthodes de lutte biologique en grandes cultures.

4.3.3.4. Lutte physique

Hormis le désherbage mécanique, la lutte physique n'est quasiment pas utilisée en grandes cultures, certainement pour des raisons de coûts et/ou d'efficacité partielle. À terme, cette méthode de lutte devrait néanmoins occuper une place significative dans les programmes de protection intégrée. En effet, les recherches dans ce domaine sont très récentes (à partir des années 1990) et n'ont pas bénéficié des mêmes efforts que la lutte chimique, la lutte génétique ou même la lutte biologique (Panneton *et al.*, 2000).

Le rôle du désherbage mécanique en végétation est de détruire les levées précoces (donc concurrentielles pour la culture) et de ne permettre que des levées qui seront contrôlées par le couvert, tout en limitant le nombre de plantes cultivées détruites par l'action des outils (sélectivité, Rasmussen, 1990). Les recherches actuelles vont dans le sens d'un meilleur raisonnement des choix d'outils, des conditions d'intervention et des fréquences de passage. L'utilisation de bineuses et de sarceuses oblige à reconsidérer les écartements et plus généralement la structure de peuplement. Par contre, le recours aux herbes à dents flexibles en céréales permet de conserver l'écartement, sans dégâts majeurs pour la culture (Real *et al.*, 1993). Le désherbage mécanique peut-il être exclusif ou complémentaire du désherbage chimique ? Les principales limites de cette technique sont connues : (1) le temps de travail est supérieur à celui d'une pulvérisation ; ainsi, en tournesol, on évalue à 1 heure par ha le temps nécessaire à une intervention au stade cotylédons à l'aide d'une bineuse 6 rangs ; (2) l'efficacité, limitée à l'inter-rang, est insuffisante : entre 75 et 85% de plantes détruites ; (3) la sensibilité de la technique aux aléas climatiques est importante, tant pour la portance que pour l'efficacité de l'opération (en particulier, lors de conditions trop humides) ; enfin, (4) le désherbage mécanique nécessite l'acquisition d'un matériel spécifique et souvent coûteux. En dehors de l'agriculture biologique, il s'agit plutôt d'une technique de complément (ou de rattrapage) utilisée en présence d'espèces résistantes ou lors de conditions sèches peu favorables à l'efficacité des traitements de prélevée (maïs, sorgho, tournesol), qui, dans un contexte d'agrandissement des surfaces, ne paraît applicable qu'avec un meilleur contrôle de l'action des outils, réduisant le temps de passage et l'attention nécessaire. L'efficacité du désherbage mécanique, très dépendante du type de sol et des conditions d'humidité, ne permet pas de fonder le programme de désherbage sur cette seule intervention, car le désherbage mécanique exclusif ne peut contrôler efficacement de fortes infestations, comme on en rencontre en agriculture biologique (Rasmussen, 1993). Cependant en céréales l'usage de la herse "peigne" combiné à une augmentation de l'écartement entre rangs permet un bon contrôle de la flore avec des possibilités d'intervention 'sélective' jusqu'à fin tallage et une vitesse d'intervention compatible avec l'organisation du travail.

4.3.3.5. Les méthodes de contrôle cultural

Ces méthodes, qui dont les effets sont bien connus, au moins qualitativement, sont peu utilisées dans l'agriculture française avec des objectifs explicites de protection des cultures et de régulation des populations de bio-agresseurs.

- *Le choix d'une succession de cultures diversifiée*

Les systèmes de culture traditionnels ont largement pratiqué la rotation des cultures pour maintenir la fertilité du sol, pratiquant l'alternance de cultures "étouffantes" ou "nettoyantes" et de cultures plus sensibles au salissement par les adventices.

L'alternance des cycles culturaux, des positions et des durées d'interculture, des matières actives employées, des types de couverts et des profondeurs de travail du sol, évite en général la sélection d'une flore spécialisée et concurrentielle (Debaeke, 1990). L'introduction d'une prairie temporaire (3-4 ans), qui maintient enfouies les semences de mauvaises herbes, permet également de réduire la densité d'espèces à stock transitoire, souvent concurrentielles (Sebillotte, 1980). Seules les espèces à stock persistant conservent la possibilité de réinfester les cultures suivantes. A l'opposé, la monotonie des cycles culturaux et des stratégies de désherbage (cas de la monoculture de céréales à paille ou de maïs) sélectionne un petit nombre d'espèces, levant avec la culture et dispersant leurs semences avant la récolte. Une flore à cycle bien calé sur celui de la culture, ayant développé des résistances aux herbicides appliqués chaque année, bénéficiant de la disparition de la flore à cycle tardif, conduit à une utilisation plus intensive des herbicides et peut remettre en cause la succession des cultures en l'absence de solution technique acceptable.

L'adoption d'une rotation combinant différents modes de préparation du sol, est une des recommandations de base de l'agriculture intégrée. Il est en effet souvent plus facile de régler certains problèmes de désherbage dans une autre culture lorsque la sélectivité de l'herbicide n'est pas assurée. Ainsi, dans une rotation maïs-soja, la lutte contre les dicotylédones est mieux assurée dans le maïs, alors que les graminées estivales sont plus efficacement détruites dans le soja. Il est plus aisé de lutter contre le chardon des champs dans un blé que dans un tournesol. La succession des cultures est à considérer en relation avec le type de travail du sol. La pratique des agriculteurs, à qui le contexte économique impose une flexibilité dans le choix de la culture, va dans le sens d'un abandon de la rotation à vocation agronomique au profit d'une succession des cultures guidée par les opportunités et les contraintes du marché, par les réglementations, par les soucis d'organisation du travail ou de disponibilité en eau d'irrigation. L'assolement est davantage raisonné que la rotation des cultures. La préconisation d'une rotation diversifiée, fixe sur 4-5 ans, paraît peu compatible avec ces exigences. L'introduction de la jachère annuelle a également bouleversé le raisonnement de la rotation et introduit de nouvelles contraintes sur le désherbage.

Les premières estimations de salissement en jachère spontanée étaient inquiétantes (Rodriguez et Mamarot, 1995) : elles ont fait craindre la nécessité d'une pression herbicide accrue sur les cultures suivantes alors que les efforts de désherbage pratiqués depuis plusieurs années pouvaient permettre d'envisager des réductions de traitement. Le semis de graminées ou de crucifères permet de contrôler plus efficacement la production semencière sur la jachère et les agriculteurs se sont orientés aujourd'hui vers ces pratiques malgré les coûts d'implantation et de destruction du couvert (SCEES). De même, la pratique des cultures intermédiaires, semées à l'automne, qui remplit des fonctions de pièges à nitrates ou d'engrais verts, permet également de limiter le reverdissement de la parcelle lors d'hivers doux et humides, prévenant ainsi des risques de grenaison avant le semis de la culture de printemps.

Le choix de la succession des cultures permet également de minimiser l'impact de certains champignons pathogènes. Ainsi, le colza est-il réputé être une bonne tête de rotation car il permet notamment de rompre le cycle des maladies céréalières (CETIOM, 2004). De plus, des phénomènes allélopathiques pourraient également contribuer à expliquer l'"effet précédent" des cultures, par une libération de composés chimiques ayant un effet direct sur la culture suivante ou sur ses bio-agresseurs (Doré *et al.*, 2004). L'allongement du délai de retour de certaines cultures permet de limiter la

constitution d'un inoculum (maladies telluriques) ; c'est le cas pour les maladies du pied des céréales ou pour le phoma du colza dont les mycélium se conservent sur les résidus de récolte. L'augmentation du risque de piétin échaudage dans le cas des systèmes à forte proportion de céréales à paille est bien documentée. Il en va de même de l'augmentation du sclerotinia dans les systèmes où pois, colza, tournesol ou soja sont souvent présents. L'objectif est de limiter la fréquence des cultures hôtes dans la succession.

- ***Le raisonnement de la date de semis***

Il est difficile de prédire les effets de la date de semis sur la levée des adventices et l'issue de la concurrence avec la culture. Une levée rapide et régulière de la culture favorise le contrôle ultérieur des adventices, ce qui renvoie au raisonnement de la date optimale de semis vis-à-vis de la température et de l'humidité du sol. Un semis trop précoce au printemps (betterave, tournesol) peut entraîner un développement d'adventices peu exigeantes en température. A l'inverse, un semis tardif de céréales d'hiver permet de bien contrôler la flore automnale et de repousser la vague de levée principale vers le printemps, alors que le couvert cultivé est bien installé. Un retard de semis interfère avec d'autres risques : réduction de la durée de végétation (semis d'hiver), déplacement du cycle vers des périodes à plus fort risque de déficit hydrique ou d'excédent thermique (semis de printemps). Comme pour les autres techniques, la décision de date de semis doit résulter d'une approche multicritère, qui confronte le risque de salissement par les adventices aux autres facteurs limitants et aux contraintes du système de production, éléments qui sont généralement déterminants pour la décision finale.

Le choix de la date de semis peut également jouer un rôle important sur la maîtrise des maladies, par évitement des périodes de forte dispersion des spores lors des phases de plus grande sensibilité de la culture comme dans le cas du phoma du colza (Aubertot *et al.*, 2004) ou du phomopsis du tournesol (Debaeke *et al.*, 2001). De plus, retarder le semis limiter généralement le développement végétatif de la culture et permet donc de se situer dans des conditions climatiques moins propices à l'infection.

- ***Le raisonnement de la densité de semis***

L'augmentation des densités de semis - voire la réduction des écartements entre rangs - permet certes d'économiser des herbicides par la couverture précoce du sol qui augmente la mortalité des plantules, réduit la croissance et limite la production semencière des adventices (Andersson, 1986). Mais, une forte densité de peuplement favorise la propagation de certaines maladies cryptogamiques chez le blé et le tournesol (proximité des pieds, maintien de l'humidité sous couvert) et augmente les risques de verse. Par ailleurs, en conditions sèches, il peut en résulter également une consommation trop rapide de la réserve en eau du sol. Enfin, le coût supplémentaire des semences peut être important. Le choix d'une variété moins couvrante ou d'une plus faible densité devra alors s'accompagner d'un écartement plus grand permettant le binage. Si le type de sol ou le climat ne permet pas de garantir une lutte mécanique satisfaisante, il faudra opter pour des écartements réduits en choisissant plutôt des variétés tolérantes aux maladies.

- ***Le raisonnement des apports d'eau et d'azote***

Une augmentation du pouvoir concurrentiel de la culture au détriment de l'adventice peut être obtenue par une fertilisation azotée bien calée sur les besoins de la culture. Ainsi l'efficacité des apports d'azote pour la culture peut être augmentée si l'on tient compte du type de flore de la parcelle (en particulier, la précocité de développement et la morphologie des adventices) (Angonin, 1995). Par ailleurs, le désherbage du blé se justifie à des niveaux de densité d'autant plus faibles que les parcelles sont plus fertilisées. Par contre, en parcelle dont la fertilisation est raisonnée, on peut s'attendre à une plus forte mortalité de plantules, en raison d'un plus fort recouvrement par la culture. Une même démarche pourrait être entreprise pour raisonner les apports d'eau : des irrigations intensives en cultures d'été augmentent la production semencière des adventices les plus hygrophiles (comme le panic), le défaut d'alimentation hydrique (culture non irriguée) étant plus pénalisant pour la survie et la croissance des adventices que la réduction d'éclairement observée en culture bien irriguée (Debaeke, 1989).

Une forte disponibilité en azote à l'automne favorise le développement du phoma sur le colza (Aubertot *et al.*, 2004). Il en va de même pour le phoma du tournesol (Debaeke et Péres, 2003). L'augmentation de la fertilisation azotée favorise les infections primaires de piétin échaudage sur blé (Colbach *et al.*, 1997). L'apport d'ammonium (au lieu d'ammonitrate) diminue les niveaux d'infection. Ces effets peuvent être provenir d'une sensibilité accrue de tissus riches en azote (p. ex., oïdium) ou de modifications du microclimat via l'augmentation de la masse végétale, d'effets sur la microflore auxiliaire (Sarniguet *et al.*, 1992). Des changements de structure du peuplement (talles, pétioles...) avec l'alimentation azotée peuvent également favoriser les attaques.

La plupart des interventions destinées à l'atteinte d'une production élevée (augmentation de la densité de peuplement, de la fertilisation azotée, de l'irrigation, réduction de l'inter-rang, par exemple) ont pour conséquences la création d'un microclimat généralement propices à certaines infections. Ainsi, la proximité des plantes et le maintien de l'humidité sous couvert en peuplement dense augmentent ils la fréquence des plantes atteintes, la précocité d'apparition et la gravité des symptômes pour de nombreuses maladies aussi bien foliaires que caulinaires (exemple du phomopsis du tournesol, Debaeke *et al.*, 2000). Par contre, la circulation des spores et la progression verticale des symptômes seraient plutôt favorisées en peuplement ouvert et bas

- ***Le contrôle de la dispersion des semences et des inoculum***

Le contrôle des mouvements de semences d'une parcelle à l'autre, à l'occasion des opérations de semis, de travail du sol ou de récolte pourrait justifier d'une attention plus importante, par le respect de certaines règles dans la conduite des chantiers. L'importance de cette dispersion a été peu quantifiée. On peut penser que l'introduction de nouvelles espèces ou de biotypes résistants est directement liée à des mouvements de semences à l'échelle d'une exploitation. Dans le cas de récoltes trop tardives, le retour au sol des semences est important et la dissémination plus faible. Si le criblage des semences n'est pas pratiqué, le recours systématique aux semences de ferme pourrait favoriser l'introduction de semences adventices lors du semis. Le maintien de bordures enherbées, source de biodiversité, pourrait limiter le développement de graminées annuelles (Watt *et al.*, 1990) et retarder ainsi leur progression en direction de la parcelle cultivée (ex. brôme stérile).

- ***Le rôle central du travail du sol***

La place prépondérante des herbicides dans la lutte contre les mauvaises herbes a permis certainement de s'affranchir, pour un temps, du rôle du travail du sol dans la maîtrise des adventices. Dans un contexte de désherbage intensif, la réduction d'une espèce est plus rapidement obtenue par le travail superficiel ; si l'on réduit la pression de désherbage, le salissement risque de s'accroître de façon marquée dans ces mêmes conditions, au profit des graminées annuelles et des vivaces (Debaeke et Orlando, 1994). Le labour permet par contre de tamponner les évolutions de flore, quelle que soit la protection herbicide, par le biais de l'enfouissement des semences de l'année et de la remontée de semences dormantes. L'alternance des modes de préparation devrait dès lors se raisonner en fonction du degré de salissement à l'issue de la culture précédente : un bilan entre production de semences de l'année et stock semencier viable du sol pourrait orienter le choix d'un outil.

Le travail du sol simplifié, qui présente des intérêts économiques et écologiques (non- dilution de la matière organique), est fortement recommandé en production intégrée pour maîtriser les mauvaises herbes. Cependant, la moindre efficacité de certains herbicides, liée à la présence de résidus en surface, et la concentration des semences adventices dans les horizons plus favorables à la germination et à la levée, peuvent introduire des risques de salissement dans des systèmes où l'on recherche une réduction des applications herbicides. L'utilisation continue de techniques de préparation simplifiées, notamment en monoculture de céréales, paraît peu réalisable sans une augmentation de la pression du désherbage chimique. Lorsque des dérives trop marquées se manifestent (par exemple, une explosion de brôme stérile), l'intervention du labour permet de rétablir un équilibre plus favorable par l'inversion du stock semencier superficiel.

La date de déchaumage doit être raisonnée par rapport au risque de grenaison des adventices, afin de permettre un enfouissement des plantes avant maturation des semences. Ceci suppose une intervention

peu après récolte et donc un enfouissement précoce des résidus de récolte. Cependant, une intervention précoce, stimulant la levée des adventices si les conditions de l'automne sont humides, peut nécessiter un travail du sol supplémentaire ou un traitement chimique avant le semis de la culture suivante.

L'état du sol au semis devrait se raisonner avec l'objectif de favoriser la levée rapide de la culture au détriment des adventices : un lit de semences plus grossier, plus sec en surface, la présence de résidus dans l'inter-rang, désavantagent la plupart des adventices, dont les semences sont souvent de petite taille et qui ne lèvent avec succès que proche de la surface.

Par la gestion des résidus de récolte, le travail du sol joue sur la conservation des inoculum de champignons pathogènes. Le maintien en surface des résidus de récolte avec les TCS est un facteur d'augmentation de la pression de nombreuses maladies telluriques en système céréalier. Le labour est ainsi recommandé dans la plupart des cas notamment pour éviter la dispersion des spores vers les autres parcelles (ex. Phomopsis, phoma du tournesol) ou éviter que les résidus infectés ne contaminent les racines de la culture suivante (maladies du pied des céréales).

4.3.4. Bilan intermédiaire pour les grandes cultures

Des expériences ont lieu en France, qui mettent en valeur l'utilité de résistances partielles aux bio-agresseurs ; ces résultats viennent en contrepoint de l'utilisation d'associations variétales pour le contrôle des bio-agresseurs. Ces deux approches diffèrent par leurs principes d'action, mais elles se ressemblent en ceci qu'elles sont fondées sur la prise de conscience qu'opposer à un bio-agresseur une barrière censée infranchissable est souvent illusoire, et sur une bonne connaissance de la biologie des bio-agresseurs et de leurs interactions avec le couvert. Egalement, elles ne sont pas destinées à gérer une situation fragilisée par des pratiques rendant le peuplement vulnérable et aux épidémies (*P*) et à leurs conséquences (*M*), mais destinées à réduire les risques d'épidémies et leurs conséquences éventuelles.

Ces deux approches ne semblent pas, en général, présenter une efficacité satisfaisante pour tous les bio-agresseurs des grandes cultures, notamment les bio-agresseurs telluriques, et les adventices. Ces dernières constituent, pourtant, le premier facteur de réduction des rendements. Un ensemble d'outils, non nécessairement chimiques, existent cependant pour leur contrôle.

Le principal levier pour la gestion des bio-agresseurs des grandes cultures semble fondé sur le raisonnement du système de culture, avec comme fondement, les objectifs de performances (quantité, qualité, stabilité) du peuplement végétal ; on recoupe ici le concept d'*Integrated Crop Management* évoqué plus haut. L'explicitation de ces objectifs permettrait d'adapter les systèmes de cultures en y intégrant les composants de protection des cultures dont ils ont besoin. Il existe très peu d'informations et d'analyses quantitatives sur l'efficacité ou l'efficience des systèmes de gestion au sein des systèmes de production. Cette absence d'éléments objectifs est un facteur qui ne peut pas ne pas gêner la promotion de ces modes de produire, aussi bien auprès des décideurs pour l'agriculture que des acteurs de la protection des cultures.

4.4. Les productions légumières

Ces productions sont très diverses, tant du point des modes de production que de la multiplicité des espèces végétales concernées. Leurs nombreuses spécificités ont bien sûr des incidences en matière de gestion de bio-agresseurs. Un rapport sur la filière Fruits et Légumes, issu des travaux d'un groupe interdisciplinaire d'experts (animé par Jeannequin et Habib, ouvrage collectif paru aux Editions INRA), permet de dresser le bilan actuel des caractéristiques et spécificités de ces productions :

La France est le 3^e pays producteur européen de légumes : elle en a produit en 2002 6.5 millions de tonnes, sur seulement 1% de la SAU française. Cela représente 44 400 exploitations agricoles cultivant des légumes (RGA 2000), avec une main d'œuvre importante (20% de la main d'œuvre agricole).

Grâce à la diversité des conditions pédoclimatiques françaises, plus de 50 espèces légumières sont produites, représentant de très nombreuses variétés (une vingtaine d'entreprises de sélection créent environ 200 nouvelles variétés par an).

Les modes de production peuvent être ainsi classés :

- 87% des surfaces portent des productions légumières en alternance avec d'autres cultures : productions dites "de plein champ",
- 10% des surfaces sont consacrées au "maraîchage de plein air", caractérisé par la production exclusive de légumes,
- 3% des surfaces sont sous abris (serres et abris hauts). On y distingue :
 - + les productions sur substrat, dites "hors-sol", souvent sous serres chauffées,
 - + les cultures en sol, souvent sous abris froids.

Les productions légumières françaises sont donc multiples, tant des points de vue des types de produits que des structures de production, allant de très petites exploitations souvent à main d'œuvre familiale à des exploitations très spécialisées aux nombreux salariés.

Beaucoup de facteurs contribuent aux évolutions rapides des structures de production ; parmi eux, la mécanisation a entraîné une spécialisation des exploitations, avec souvent un déplacement des zones de maraîchage de plein air vers des régions de production de plein champ. Ceci a conduit à une concentration des cultures légumières sur 4 principaux grands bassins de production.

4.4.1. Les bio-agresseurs des productions légumières

Il n'est ni simple ni satisfaisant de traiter globalement de l'ensemble de productions aussi diverses. Elles seront ici regroupées en 2 grandes classes, additionnées d'une classe intermédiaire :

- les cultures légumières de plein champ (productions de plein champ et maraîchage de plein air), autour des principales productions que sont la carotte, les choux, les haricots verts et les Alliées (oignon, poireau...).
- les cultures hors-sol, avec principalement tomate, concombre, melon et endive.
- les cultures en sol sous-abris représentent, du point de vue des questions soulevées en matière de gestion des bio-agresseurs, un intermédiaire entre les 2 grands types de production cités ci-dessus (cultures en sol comme la première classe, mais dans un environnement clos comme la deuxième). On y retrouve principalement la tomate, les salades, la courgette, le melon et le concombre.

Sur de multiples modes et situations de productions, ainsi que de nombreuses familles, espèces botaniques et variétés, il est clair que peut se manifester une très grande diversité de bio-agresseurs potentiels. De plus, face aux évolutions parfois très rapides, ainsi qu'aux échanges très importants entre pays, le risque d'émergence de nouveaux problèmes est permanent.

| Plein champ | Sol sous abris | Hors-sol | | Champignons s.l. et bactéries | | Virus, viroïdes et mycoplasmes transmis par | | Nématodes | Insectes | Acaréens | Adventices | Mollusques |
|-------------|----------------|----------|----------------|-------------------------------|---------|---|----------|-----------|----------|----------|------------|------------|
| | | | | associés au sol | aériens | champignons du sol | insectes | | | | | |
| | | | Carotte | +++ | + | - | + | +++ | +++ | - | ++ | + |
| | | | Choux | + | + | - | ++ | ++ | +++ | - | ++ | + |
| | | | Haricots verts | ++ | + | - | + | - | + | - | ++ | + |
| | | | Oignon | ++ | ++ | - | - | + | ++ | - | ++ | + |
| | | | Poireau | ++ | ++ | - | - | + | ++ | - | ++ | + |
| | | | Courgette | | | | | | | | | |
| | | | Salades | | | | | | | | | |
| | | | Melon | | | | | | | | | |
| | | | Tomate | | | | | | | | | |
| | | | Concombre | | | | | | | | | |
| | puis | | Endive | ++ | - | - | - | - | - | - | - | - |

Tableau 4.4-1. Importance des bio-agresseurs, en productions légumières, considérée sous l'angle des difficultés de gestion

| Plein champ | Sol sous abris | Hors-sol | | Champignons et bactéries associés au sol | Virus, viroïdes et mycoplasmes transmis par organismes du sol | Insectes du sol | Nématodes | Adventices |
|-------------|----------------|----------|----------------|--|---|-----------------|---|------------------|
| | | | Carotte | <i>Pythiacées</i> <i>Rhizoctonia solani</i> <i>Streptomyces scabies</i> | | Taupins | <i>Heterodera carotae</i> | Grande diversité |
| | | | Choux | <i>Plasmiodiophora brassicae</i> <i>Phoma lingam</i> | | | <i>Heterodera cruciferae</i> <i>Heterodera schachtii</i> | |
| | | | Haricots verts | <i>Rhizoctonia solani</i> <i>Chalara spp.</i> <i>Fusarium solani</i> | | | | |
| | | | Oignon | <i>Sclerotium cepivorum</i> <i>Peronospora destructor</i> | | | <i>Ditylenchus dipsaci</i> | |
| | | | Poireau | <i>Pyrenochaeta terrestris</i> <i>Phytophthora porri</i> | | | <i>Ditylenchus dipsaci</i> | |
| | | | Courgette | | | | | |
| | | | Salades | | | | | |
| | | | Melon | | | | | |
| | | | Tomate | | | | | |
| | puis | | Endive | <i>Erwinia atroseptica</i> <i>Chalara elegans</i> <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> <i>Phytophthora cryptogea</i> | | | | |

Tableau 4.4-2. Principaux bio-agresseurs d'origine tellurique des productions légumières

| Plein champ | Sol sous abris | Hors-sol | | Champignons aériens | Virus, viroïdes et mycoplasmes transmis par insectes | Insectes |
|-------------|----------------|----------|----------------|---|--|--|
| | | | Carotte | <i>Alternaria dauci</i> | CDMV | Mouche carotte Pucerons |
| | | | Choux | <i>Alternaria brassicicola</i> | CMV | Mouche chou Noctuelles Pucerons Altises Teigne |
| | | | Haricots verts | Anthracnose <i>Sclerotinia spp.</i> <i>Botrytis cinerea</i> Graisse du haricot | Mosaïques (B.C.M.V, B.Y.M.V.) | Mouche des semis Pyrale du maïs |
| | | | Oignon | Rouilles <i>Alternaria porri</i> <i>Botrytis allii</i> Graisse du poireau | | Mouche oignon Mouche mineure Thrips |
| | | | Poireau | | | Thrips Teigne poireau Mouche oignon |
| | | | Courgette | | | |
| | | | Salades | | | Pucerons |
| | | | Melon | | | |
| | | | Tomate | | | |
| | | | Concombre | | | |
| | puis | | Endive | | | |

Tableau 4.4-3. Principaux bio-agresseurs aériens des productions légumières

4.4.1.1. Notion de pertes sur cultures légumières

La relation épidémie-dégât-dommages-pertes évoquée ci-dessus s'exprime d'une manière particulière dans le cas de la plupart des cultures légumières. En effet :

- les dégâts induits par les bio-agresseurs se traduisent souvent directement en pertes de récolte car les organes attaqués sont souvent les organes récoltés ("légumes-feuilles", "légumes-racines").
- la production est majoritairement consommée sans transformation industrielle. Les pertes qualitatives sont donc extrêmement préjudiciables économiquement, et la fonction de pertes (économique) est de ce fait fortement discontinue, une dépréciation qualitative même très réduite pouvant induire d'énormes pertes économiques dans le contexte actuel de forte concurrence (refus de lots, déclassements, par exemple).

Ces points amènent à appréhender les notions de seuil et de situation de production d'une manière spécifique dans le cas des cultures légumières, dans le cas de chacune de ces cultures, voire dans le cas de chacune des filières de production auxquelles ces cultures sont rattachées.

4.4.1.2. Spécificités des productions légumières en matière de gestion des problèmes parasitaires

Les cultures légumières présentent d'importantes spécificités pour appréhender la gestion des parasites et ravageurs. Il s'agit de productions à haute valeur ajoutée, conduites de façon intensive (intrants, conduites culturales) et nécessitant généralement une main d'œuvre importante. Il s'en suit des coûts de production très élevés, et de ce fait :

- l'aversion de l'exploitant aux risques devient ici un facteur majeur de décision quant aux méthodes de contrôle qui sont employées, et quant à la marge de manœuvre pour d'éventuelles évolutions;

- le coût des pesticides ne représente qu'un faible poids par rapport à l'ensemble des charges;
- toute pratique de protection impliquant un surcroît de main d'œuvre ou réduisant l'exploitation des surfaces par des cultures commerciales est *a priori* mal considérée par l'exploitant.

La lutte chimique apparaît donc pour la plupart des producteurs en cultures maraîchères comme le moyen de gestion des bio-agresseurs le plus simple, le plus efficace et le moins coûteux.

Pourtant, pour certains modes de production (cas des environnements clos, à climat partiellement maîtrisable), des possibilités supplémentaires de gestion du parasitisme sont offertes par la maîtrise de l'environnement (gestion du climat, possibilité de vide phytosanitaire). De plus, les producteurs ont de tous temps eu l'habitude et le souci d'assurer une surveillance rapprochée de leurs cultures, autorisant une prise en compte fine de l'apparition et de l'évolution des problèmes. D'autre part, les possibilités d'application de techniques spécifiques complexes (paillages...) sont beaucoup plus importantes dans ce type de productions que par exemple en grandes cultures.

Les consommateurs et citoyens sont particulièrement sensibilisés aux impacts négatifs de l'utilisation des pesticides sur légumes car :

- les zones de production sont souvent des zones sensibles (côtières, péri-urbaines) auxquelles les citoyens sont attachés,
- les consommateurs sont d'autant plus vigilants à la qualité des légumes qu'ils les consomment généralement sans transformation industrielle.

Les attentes sont donc fortes, tant du point de vue des citoyens que des consommateurs, pour infléchir des changements profonds en matière de gestion des problèmes parasitaires.

4.4.2. Les pratiques actuelles

4.4.2.1. Les pratiques de désinfection des sols par fumigation

Les fumigants sont des substances liquides ou solides qui génèrent des gaz toxiques qui, par diffusion dans le sol, agissent sur les organismes telluriques (microorganismes, nématodes, semences d'adventices). Leur spectre d'activité est donc généralement très large, et ils visent aussi bien les formes actives que les formes de conservation dans le sol (kystes de nématodes, sclérotés de champignons, spores de conservation, semences dormantes d'adventices). Bien que très coûteuse (1000 à 10 000 € par hectare), cette pratique est très courante sur cultures légumières (12 000 à 15 000 hectares par an), car le producteur y trouve une façon simple de s'affranchir à court terme des différents problèmes parasitaires potentiels de ses cultures. Cependant, les effets non intentionnels de ces fumigants sont importants, et le protocole de Montréal (1997) a imposé une limitation progressive de l'utilisation du bromure de méthyle, jusqu'à interdiction totale (hors usages critiques) en 2005. Les alternatives chimiques à cette substance active sont très limitées, moins polyvalentes, et elles aussi soumises, *via* les écotaxes, à de sévères restrictions. Il s'agit de 3 fumigants aux propriétés fongicides et nématicides (métam-sodium, tétrathiocarbonate de sodium et dazomet) et d'un fumigant nématicide (dichloropropène). Les producteurs légumiers en sont encore extrêmement dépendants, y trouvant des bénéfices additionnels au simple objectif visé : réduction des risques fongiques et nématologiques proprement dits, mais aussi technique simple de désherbage avant implantation de la culture, et moyen de garantir régularité et gains de rendements. Dans le contexte économique actuel, et face à l'absence d'alternatives aussi « performantes » que les fumigations, ces pratiques de désinfections "d'assurance" sont encore très prisées des producteurs légumiers et donc très utilisées.

4.4.2.2. Cultures mineures et restriction d'emploi des produits phytosanitaires

Le marché des pesticides utilisables sur cultures légumières ne représente qu'une faible proportion du revenu des firmes phytosanitaires. Celles-ci ne les considèrent donc pas comme prioritaires en termes de stratégies d'homologation. La directive 91/414/CE a encore complexifié la situation de la gestion de la lutte chimique. Sur 800 matières actives homologuées en Europe en 1990, moins de la moitié le

seront encore en 2010. Certaines productions légumières se trouvent ainsi en situation d'impasses techniques liées à ce retrait de molécules toxiques ou à usage mineur. La survie de certaines productions en est compromise, et les risques économiques sont tels que le recul pour appréhender cette situation nouvelle n'est pas suffisant : force est de constater que, face à cette situation, on assiste actuellement, même au niveau des programmes d'expérimentation, à une "course aux molécules de remplacement" plutôt qu'à une anticipation suffisante pour construire des stratégies alternatives à la lutte chimique.

| Principales méthodes de lutte | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
|--|--------------------|---|----------------------|--|---|---|
| Principaux groupes de bio-agresseurs | | | | | | |
| Champignons s.l. | associés au sol | (1) désinfections de sol principalement | (1) | (1) à (2) Contans, contre Sclerotinia spp. et Sclerotium | (1) à (2) solarisation (2) - mulchs/mildiou - thérapie pour semences (3) biodésinfection | (1) drainages, irrigations, raisonnements fertilisations et amendements |
| | aériens | (1) | (1) | | | (1) drainages, irrigations |
| Bactéries | | | (1) | | | |
| Virus, viroïde et mycoplasmes transmis par | Champignons du sol | | | | | |
| | Insectes | (1) | | (3) | | |
| Acariens | | | | | | |
| Insectes | | | (1) | (3) | (2) filets, paillages | (1) décalages dates semis ou récoltes/mouches (2) cultures associées |
| Nématodes | | (1) désinfections de sol | (1) | | (1) à (2) solarisation (3) biodésinfection | (2) cultures nématicides (2) cultures pièges |
| Adventices | | (1) | | | (1) sarclages, binages (1) à (2) solarisation (2) paillages, mulchs (2) thermique | (2) faux-semis (2) cultures associées |
| Mollusques | | (1) | | | | |

Tableau 4.4-4. Les pratiques actuelles et les innovations possibles en cultures légumières de plein champ

(1) existante ; (2) existante mais non utilisée ; (3) potentielle

4.4.3. Les alternatives

4.4.3.1. Les alternatives en matière de gestion des bio-agresseurs telluriques

La gestion des bio-agresseurs telluriques est indispensable en cultures légumières. Jusqu'à présent, leur impact potentiel n'est pris en considération qu'une fois le système de production conçu et mis en place. L'approche est donc une simple approche tactique de court terme, souvent basée sur des fumigants à large spectre, actuellement totalement remis en question à cause de leur "coût écologique". Les agriculteurs sont donc en situation très inconfortable, totalement dépendants de la législation et des cahiers des charges de la distribution.

Pourtant, il existe des moyens de réduire les risques, à condition de faire le choix d'une approche stratégique, plaçant d'emblée le système de culture en situation défavorable aux bio-agresseurs du sol. Les pratiques culturales pour minimiser les risques telluriques en productions légumières sont connues selon les parasites concernés (Messiaen *et al.*, 1991) : raisonnement de la fertilisation et des amendements, maîtrise de l'eau (drainage, raisonnement de l'irrigation), amélioration de la structure du sol, utilisation de matériel de départ sain (semences, plants)... Notons que ces moyens, qui relèvent généralement du bon sens, sont souvent sous-exploités, la possibilité de désinfections du sol ayant conduit les producteurs à s'affranchir, dans le raisonnement même de leurs systèmes de culture, des risques parasitaires.

La solarisation, développée dans les pays aux conditions climatiques adaptées (Israël, USA, par exemple) permet d'obtenir des effets probants tant sur les microorganismes du sol (champignons et bactéries) que sur les nématodes et populations d'adventices (Foury, 1995, Chellimi *et al.*, 1997, Keinath, 1995). De nombreux travaux y sont consacrés depuis les années 70. Mais dans nos conditions, la durée d'ensoleillement est insuffisante dans la majeure partie des zones de production (Thicoïpe, 1994). Nous verrons plus loin comment cette technique peut être associée avec d'autres méthodes de réduction des bio-agresseurs.

Beaucoup de travaux sont consacrés à l'apport d'amendements pour modifier les caractéristiques pédologiques, comme par exemple l'apport d'amendements calciques (sables calcaires) pour augmenter le pH du sol et ainsi indirectement réduire les risques de hernie des Crucifères en cultures de choux (Rouxel *et al.*, 1988). De très nombreux auteurs démontrent l'intérêt d'apport d'amendements organiques (déchets ou résidus de plantes). Ainsi, Subbarao *et al.* (1999) et Block *et al.* (2000) observent une réduction nette de la survie de plusieurs champignons telluriques par l'incorporation de broyats de choux ou Graminées. Les observations de Mazzola *et al.* (2001) vont dans le même sens avec des tourteaux de colza (en pépinières de pommiers). Le mode d'action d'amendements à base de résidus végétaux (Crucifères notamment) est largement documenté et relève généralement de la libération de glucosinolates qui s'hydrolysent en composés soufrés (isothiocyanates) hautement toxiques pour les organismes du sol.

Mais la bibliographie actuelle est surtout riche d'expériences démontrant l'intérêt de la combinaison d'amendements organiques et de la solarisation (Gamliel *et al.*, 2000, Gamliel et Stapleton, 1993, Keinath, 1996, Stevens *et al.*, 2003). En France, cette combinaison est dénommée "biodésinfection" et étudiée depuis 1997 par le CTIFL (Villeneuve et Lepaumier, 2000). Elle repose souvent sur la culture d'une plante à effets allélopathiques (Doré *et al.*, 2004), suivie de son enfouissement accompagné d'un bâchage, ou, au minimum, d'un roulage. Un colloque y a été récemment consacré en Italie ("Fumigation : a possible alternative to methyl bromide", 31/03/04 au 01/04/04, Florence). De façon plus générale, nombreux sont les travaux consacrés à l'optimisation de la gestion de l'interculture, mettant en évidence la grande incidence du type de succession culturale sur les risques parasitaires (champignons, nématodes, adventices) (Sumner *et al.*, 1995, Dillard *et al.*, 2004). De même, une voie originale pour réduire les populations de nématodes est l'insertion de cultures dites "nématocides" (Tagetes, Radis fourrager, Sorgho menu... ; synthèse des recherches effectuée en 2001 par Villeneuve *et al.*) ou même de cultures pièges (cultures-hôtes détruites avant le cycle complet des nématodes) dans le cas de nématodes endoparasites très spécifiques comme les nématodes à kystes. Cette dernière méthode n'est cependant pas suffisante pour abaisser ces populations en dessous du seuil de nuisibilité (Bossis, com. pers.).

Tous ces travaux mettent en évidence les potentialités de telles techniques, prises individuellement et surtout associées, pour réduire les risques de bio-agresseurs, mais aussi leurs limites actuelles : une synthèse en est notamment dressée par Chellimi (2002) : en conditions naturelles, le principal facteur limitant à leur adoption est la variabilité des résultats, qui s'explique par la complexité des interactions et des processus mis en œuvre, mais doit être analysée de manière rigoureuse si l'on veut progresser vers l'utilisation de telles possibilités alternatives à la lutte chimique.

Un seul agent de lutte biologique est homologué en France (*Coniothyrium minitans*), destiné aux *Sclerotinia* et *Sclerotium* (Aertsens et Michi, 2004). A l'étranger, davantage de travaux y sont consacrés, démontrant souvent l'intérêt de l'association solarisation – lutte biologique (Ristaino *et al.*, 1991, Elad *et al.*, 1980).

De nombreux verrous de connaissance existent encore pour que les pistes actuelles puissent évoluer en réels moyens de gestion. Le principal est l'analyse rigoureuse des causes de variabilité des résultats, pour ensuite se donner les moyens d'adapter et optimiser les solutions existantes selon les diverses situations de production.

Les principaux obstacles à leur mise en œuvre semblent les suivants : quand il s'agit de parasitisme tellurique, la prévision des risques n'est pas simple et le diagnostic souvent peu aisé, ce qui incite à l'utilisation de méthodes d'"assurance". D'autre part, le principal facteur limitant à l'heure actuelle à l'analyse plus approfondie et à l'utilisation potentielle de modes de gestion modifiant la rotation, provient des créneaux de temps trop courts entre 2 cultures maraîchères de production, de surcroît souvent hors saison végétative, pour introduire des cultures à objectif assainissant. Le coût indirect important d'éventuelles stratégies alternatives, telles que celles citées ci-dessus, est considérable pour ces cultures à haute valeur ajoutée. Quand les possibilités de traitement chimique des sols, pourtant coûteuses, existent, elles sont toujours privilégiées car simples et plus rentables.

4.4.3.2. Les alternatives en matière de gestion des ravageurs aériens en plein champ

Vis-à-vis des insectes, il existe davantage de solutions disponibles pour limiter les dégâts que vis-à-vis des bio-agresseurs telluriques. En effet, diverses méthodes non chimiques de protection sont démontrées efficaces pour maîtriser les insectes en cultures légumières de plein champ. Mais, à l'heure actuelle, c'est en culture biologique qu'elles sont mises en œuvre : filets et paillages sont défavorables au développement des mouches et thrips, mais également limitent adventices et mildiou sur poireau (Poll, 1996). Les décalages des périodes de semis ou plantations permettent une nette réduction des problèmes de mouches (du chou et de la carotte). Des cultures de trèfle en association avec le chou de production conduisent à s'affranchir à la fois des thrips et de la rouille du poireau (Theunissen et Schelling, 1996). De même, une association chou-navet permet d'augmenter l'attraction des staphylins (à la fois prédateurs et parasitoïdes de la mouche du chou) introduits et natifs et donc de réduire les attaques de *Delia radicum* sur brocolis (Rousse *et al.*, 2003). Devant le retrait programmé des principaux insecticides destinés à combattre la mouche du chou, des expérimentations ont été conduites, suite aux travaux de Fournet *et al* (1999), par Le Corre *et al.* (2004), pour introduire des staphylins et les maintenir par la culture associée d'oignons préalablement contaminés par la mouche de l'oignon. Les 3 années d'expérimentations s'avèrent concluantes, et la lutte biologique compatible avec la lutte chimique, sans que soient évoqués les moyens d'adapter cette méthode en pratique.

En Grande-Bretagne, les travaux de Finch et Collier (2000) dressent un bilan de la protection intégrée vis-à-vis des insectes (mouches principalement) sur légumes de plein champ d'Europe du Nord : les méthodes existent, associant l'application d'insecticides sélectifs à dose réduite, la combinaison de la surveillance rapprochée des parcelles et de l'utilisation des systèmes de prévision des risques, pour réduire de façon très importante le recours à la lutte chimique. L'utilisation de plantes partiellement résistantes permet la réduction des doses d'insecticides (non admise par les firmes phytosanitaires), de même que la pratique du semis sous couverts (trèfle). Pour ces auteurs, il s'agit maintenant d'identifier les situations culturales adaptées aux diverses possibilités d'IPM et d'accompagner scientifiquement et techniquement les agriculteurs dans une telle démarche. De même, Parker *et al* (2002) établissent un constat similaire sur pucerons (4 espèces) de la laitue : l'IPM est possible sous condition d'une surveillance et d'un accompagnement par des personnes techniquement pointues, sachant dissocier les espèces pour que soient prises en compte phénologie et quantités de pucerons.

Aux USA, Reitz *et al.* (1999) démontrent l'intérêt et la viabilité économique d'un programme d'IPM basé sur l'association d'agents de lutte biologique et d'insecticides très sélectifs sur un complexe de bio-agresseurs sur céleri. Les auteurs concluent à la nécessité de multiplier de tels essais de démonstration pour convaincre et motiver les producteurs vers de tels programmes.

Pourtant, malgré ces possibilités, la gestion des insectes en cultures légumières de plein champ repose actuellement presque exclusivement sur la lutte chimique. On assiste cependant à une évolution vers des matières actives insecticides beaucoup plus sélectives, préservant davantage les ennemis naturels, ce qui pourrait donc permettre la réelle intégration de la lutte biologique dans des systèmes IPM (Naranjo, 2001). Notons cependant que Hummel *et al.* (2002a, 2002b), de même que House et Del

Rosario Alugaray (1989) comparent l'incidence de plusieurs systèmes de production de légumes, différant par les travaux du sol, le type de protection (biologique ou insecticide) et la rotation (monoculture ou extensive) sur les populations d'arthropodes des légumes et sur leurs ennemis naturels, sans démontrer de façon nette l'intérêt du système le moins intensif en termes de populations de ravageurs et de prédateurs.

Enfin, signalons une étude économique intéressante aux Philippines : Cuyno *et al.* (2001) évaluent au moyen d'enquêtes les gains économiques liés aux bénéfices en termes de santé humaine et d'effets environnementaux apportés par les programmes IPM sur oignon. Ils soulignent l'importance, pour l'acceptabilité de ces programmes, d'évaluer et considérer non seulement les données économiques de productivité mais aussi les gains associés aux bénéfices environnementaux.

Des verrous de connaissance existent encore pour l'utilisation de ces méthodes limitant les risques de ravageurs tout en réduisant drastiquement l'utilisation des pesticides en cultures légumières (par exemple le manque de techniques pour fixer les parasitoïdes sur la parcelle). Il apparaît également clairement que la grande majorité des études sont menées à l'échelle de la parcelle plus qu'à celle de la microrégion, échelle pourtant plus pertinente pour ces insectes et leurs régulateurs naturels.

Les principaux obstacles à la mise en œuvre de telles techniques sont souvent liés à la nécessité de personnels formés techniquement tant pour un diagnostic sérieux et les études phénologiques associées que pour les suivis des populations de parasitoïdes et prédateurs introduits. De même, plusieurs auteurs concluent à la nécessité de renforcer les essais de démonstration, donc d'une interface efficace entre recherche et production.

4.4.3.3. Les alternatives en matière de gestion des ravageurs aériens en sol sous abri

La serre, dotée d'un microclimat chaud et humide, constitue un environnement particulièrement favorable au développement des cultures maraîchères, mais aussi de champignons et bactéries phytopathogènes, ainsi que de nombreux ravageurs dont certains sont vecteurs de viroses graves. Traditionnellement, la production maraîchère sous abri est donc, elle aussi, fortement tributaire de méthodes chimiques de protection contre les bio-agresseurs. C'est aussi dans ce système de culture que des approches intégrées, combinant différentes méthodes alternatives sont utilisées depuis de nombreuses années (Albajes *et al.* 1999).

L'utilisation de variétés résistantes

Pour toutes les espèces légumières cultivées sous serre, il existe depuis longtemps des variétés résistantes ou tolérantes à certains bio-agresseurs, et de nouvelles sources de résistance sont régulièrement décrites dans la littérature scientifique (Caranta *et al.* 2003, Laterrot, 1989, Lecoq *et al.* 2004, Pitrat & Causse 2004). La tolérance/résistance aux ravageurs y prend une part croissante, même si elle reste encore assez peu exploitée commercialement (Ellis & Kift 2003, van Lenteren 2000).

Les principaux freins au développement et à l'utilisation de variétés maraîchères moins sensibles sont les suivants :

- Le choix de variétés résistantes par le serriste reste conditionné par leurs qualités agronomiques (rendement, aspect des fruits/légumes) ou gustatives.
- Comme pour d'autres espèces cultivées, cette méthode de lutte est par ailleurs compliquée par le turn-over très rapide des variétés mises sur le marché et par des phénomènes de contournements récurrents de la résistance au sein des populations de certains bio-agresseurs (nombreuses viroses, et champignons responsables du mildiou, de l'oïdium, et de la cladosporiose, par exemple; Lecoq *et al.* 2004). De nombreux travaux de recherche en cours visent à renforcer la durabilité des résistances des espèces maraîchères, par l'exploitation de sources de résistance polygéniques (mise au point de méthodes de sélection assistée par marqueurs, mettant en œuvre des outils de biologie moléculaire; Thabuis *et al.* 2004).
- La lourdeur des travaux (et des investissements) nécessaires complique la sélection simultanée de résistances à plusieurs bio-agresseurs. La mise en œuvre de techniques de transgénèse pourrait offrir des potentiels pour lever ce type de verrou technologique (Mohan Babu *et al.* 2003).

- La tolérance variétale à certains insectes vecteurs de viroses graves sous serre (pucerons, aleurodes) reste d'un intérêt limité pour le serriste si elle n'affecte pas suffisamment la transmission plante à plante de la maladie (Pauquet *et al.* 2004).

La tolérance à certaines maladies (en particulier des viroses) n'empêche généralement pas l'agent infectieux de se multiplier sur la plante contaminée (Lecoq *et al.* 2004, Pauquet *et al.* 2004). Celle-ci peut alors servir de réservoir d'inoculum pour d'autres plantes et éventuellement de site de sélection de variants de l'agent infectieux à pouvoir pathogène accru.

Des pratiques culturales préventives

La prophylaxie est un élément clé de la protection des cultures sous abris. Parmi les mesures disponibles, on peut noter (Jarvis 1992) :

- l'utilisation de plants sains pour installer la culture en début de saison (plants indemnes de viroses ou d'infections latentes de champignons ou bactéries, et ne portant pas de larves ou d'œufs de ravageurs) ;
- la mise en place de protections contre l'entrée de ravageurs ou d'inoculum (sas d'entrée, filets insect-proof sur les ouvrants, pédiluves contre les pathogènes/ravageurs véhiculés sous les chaussures) ;
- des précautions pour éviter les contaminations lors des très nombreuses interventions culturales pratiquées sous serre (palissage des plants, effeuillages, ébourgeonnages, récoltes en continu): désinfection des instruments de taille, des mains des opérateurs ; choix des méthodes d'effeuillage posant le moins de risque d'infection des plaies de taille (Decognet *et al.* 1998) ;
- pratique d'un vide sanitaire entre deux cultures, pour éliminer/diminuer les populations de ravageurs et l'inoculum de microorganismes, de façon passive ou en combinaison avec la désinfection des structures de serre, le remplacement des substrats, paillages, etc. ;
- l'identification des plantes réservoir et leur élimination aux abords des serres (Ridray, 2004).

Gestion du microclimat

La gestion du microclimat est possible dans les serres chauffées et généralement assurée par un ordinateur (combinaisons de chauffage / aération). Pour les principales maladies cryptogamiques à dissémination aérienne, des études ont démontré l'impact épidémiologique des excès d'humidité sous serre et l'intérêt d'en diminuer la fréquence et la durée (Arny & Rowe 1991, Duthie 1997, Eden *et al.* 1996, Jarvis 1992). Le choix de structures de serres adaptées (dimensions, systèmes de chauffage, d'aération) et des pratiques culturales affectant le microclimat peuvent aussi être utilisées en complément (densité et architecture des plantes, fréquence et méthodes de palissage et de taille) (Jarvis 1992).

Les freins principaux à l'utilisation de cette méthode potentiellement très efficace sont les coûts énergétiques engendrés, et les difficultés de gestion de conflits éventuels avec des consignes liées à la productivité de la culture (Jewett & Jarvis, 2001). Pour assister le serriste dans des choix difficiles de consignes, les systèmes experts développés pour optimiser la gestion du microclimat en fonction des besoins de production des plantes doivent être complétés par des données de modèles épidémiologiques permettant de tenir compte des contraintes de protection de la culture. Pour être pleinement efficaces, il est indispensable que ces systèmes puissent conduire à un contrôle effectif du microclimat à la surface du végétal (à l'intérieur de la couche limite) au niveau des bio-agresseurs, car celui-ci peut être sensiblement différent du microclimat dans l'air environnant la canopée (Jewett & Jarvis, 2001). Ceci constitue un verrou technologique et de connaissance important, qui nécessite la mise au point de capteurs électroniques utilisables à l'échelle de quelques microns pour mesurer le microclimat dans la couche limite, et des efforts de modélisation considérables pour prédire l'impact sur ce microclimat d'interventions pilotées à partir des grandeurs mesurées habituellement dans la canopée ou à l'extérieur de la serre (Bakker *et al.* 1995, Huber & Gillespie 1992).

Gestion de la fertirrigation

En système hors-sol, les plantes sont alimentées en eau et éléments nutritifs à l'aide d'un système goutte-à-goutte, généralement piloté par un ordinateur qui gère la composition de la solution, la fréquence et la durée des apports. La gestion de la fertirrigation contrôle la vigueur des plantes et peut affecter directement leur réceptivité à certains bio-agresseurs, notamment si des stress hydriques ou osmotiques (salinité de la solution nutritive) sont induits, ou bien si l'apport macro-nutritionnel est déséquilibré par rapport à la capacité photosynthétique liée à la quantité de lumière reçue par la culture et à la température ambiante (Messiaen *et al.* 1991).

Par ailleurs, des apports ciblés de certains micro-éléments (silice, notamment) ont été utilisés avec succès pour renforcer la résistance naturelle de certaines espèces à différents bio-agresseurs (Paulitz & Bélanger 2001).

La protection biologique et intégrée

Des agents de lutte biologique sont utilisés depuis longtemps avec succès contre certains ravageurs des cultures sous serre (van Lenteren, 2000). Au niveau européen, Maisonneuve *et al.* (2003) estiment que la France arrive au 2^e rang (derrière les Pays Bas) avec près de 2 000 ha de cultures légumières en protection biologique et intégrée (PBI). Les deux principales cultures concernées sont la tomate et le concombre, représentant chacune 65% et 12% des surfaces légumières en PBI. C'est-à-dire qu'environ 55% des cultures de tomates, et 70% des cultures de concombre sont en PBI, avec une tendance de forte croissance depuis 1997 (Maisonneuve *et al.*, 2003). Si l'on considère uniquement la tomate produite en serres chauffées hors sol, ces chiffres monteraient à environ 80% (Trottin Caudal, CTIFL, communication personnelle), avec une forte motivation de certains groupements de producteurs (Prigent *et al.*, 2003).

Démarrée dans les années 80 avec l'utilisation de l'auxiliaire *Encarsia formosa* sur la tomate contre l'aleurode des serres (*Trialeurodes vaporariorum*), la PBI mobilise maintenant une douzaine d'auxiliaires contre plusieurs types de ravageurs, aleurodes, pucerons, acariens, mineuses, principalement (Fargues, 2002 ; Maisonneuve *et al.*, 2003). Très récemment, des champignons entomopathogènes (*Beauveria bassiana*, *Lecanicillium lecanii*), ont également été homologués en France pour lutter contre les aleurodes, et leur efficacité avec les conditions climatiques sous serre en climat méditerranéen a été examinée (Fargues *et al.*, 2003). Contrairement aux phénomènes rencontrés dans d'autres systèmes avec les préparations à base de *Bacillus thuringiensis*, la durabilité des auxiliaires et myco-insecticides utilisés sous serre n'a pas été remise en question par l'apparition de variants résistants. Cependant, le spectre d'hôte généralement étroit des produits existants limite leur efficacité en cas d'introduction de nouvelles espèces de ravageurs, comme par exemple le thrips *Frankliniella occidentalis* dans les années 1990, et récemment, l'aleurode *Bemisia tabaci* et les punaises *Nesidiocoris tenuis*, *Nezara viridula* (Trottin-Caudal *et al.*, 2003). Ces introductions ont été particulièrement préoccupantes du fait de la capacité de certains de ces ravageurs à transmettre des virus (TSWV, et plus récemment TYLCV, ToCV, TICV) classés comme parasites de quarantaine (Dalmon *et al.* 2003). Cette situation incite les serristes à recourir à des insecticides, et remet en question la PBI tant que des méthodes alternatives ne sont pas développées contre les nouveaux ravageurs et les maladies qu'ils transmettent.

D'autres verrous de connaissance subsistent (Albajes, 2002), notamment (1) sur les risques (pour des espèces non cibles) associés à l'introduction d'espèces exotiques d'auxiliaires ou d'agents microbiens; (2) pour stimuler le passage d'approches empiriques d'acclimatation d'auxiliaires, à des actions plus précises basées sur des études écologiques fines, impliquant notamment des développements théoriques/conceptuels sur la modélisation des relations proies-prédateurs; (3) l'application de la biotechnologie pour améliorer l'efficacité de la lutte biologique (compétences écologiques des agents de lutte biologique, ou de leur efficacité).

Par contraste avec la situation contre les ravageurs, la lutte biologique contre les maladies affiche un retard considérable dans son développement commercial, malgré l'abondance de travaux de recherche (Nicot 2002, Stewart 2001). Il n'existe en France aucun agent de lutte biologique autorisé contre les maladies à dissémination aérienne des cultures maraîchères. Parmi les quelques produits commerciaux

homologués dans d'autres pays, beaucoup ont été développés initialement pour la protection contre des maladies telluriques et ont une application secondaire contre les maladies aériennes sous serre. C'est le cas notamment de produits à base de *Streptomyces* sp., *Trichoderma* sp, *Gliocladium catenulatum* et *Pythium oligandrum* (Nicot 2002; Ravensberg & Elad 2002; Whipps 2002). Le champignon hyperparasite *Ampelomyces quisqualis* est homologué contre l'oïdium de diverses cultures (dont des cultures légumières) dans quelques pays européens, aux Etats Unis et en Afrique du Sud. On assiste également depuis quelques années à l'homologation (à l'étranger) de quelques "produits naturels" (extraits de plantes, de microorganismes le plus souvent) stimulant les défenses naturelles des plantes, qui accompagne une recrudescence de travaux de recherche dans ce domaine (Descoins 2002; Ravensberg & Elad, 2002).

Parmi les raisons évoquées pour expliquer le hiatus entre recherche et développement commercial d'agents de lutte biologique contre les maladies, les plus fréquemment citées (Elad *et al.* 1996 ; Jewett & Jarvis 2001 ; Nicot 2002 ; Ravensberg & Elad 2002) sont :

- (1) économiques : coût élevé de la démarche d'homologation (nécessaire en Europe pour les agents microbiens et les substances naturelles, contrairement aux macro-organismes auxiliaires utilisés contre les ravageurs) ; coûts de développement élevés; étroitesse du marché potentiel, liée au contexte socio-économique actuel et au spectre d'action généralement étroit des produits (forte spécificité vis-à-vis d'un agent pathogène, voire d'un couple hôte/pathogène)
- (2) techniques : impact de l'environnement sur la régularité de l'efficacité en conditions commerciales; difficultés de maîtrise de la qualité et de la "shelf life" des produits de lutte biologique; maîtrise de la rémanence des produits sur les cibles à protéger.

L'évolution actuelle du contexte socio-économique visant à réduire l'impact des pesticides devrait apporter des éléments favorables, sans pallier totalement les difficultés économiques de la lutte biologique citées ci-dessus. Pour lever le principal verrou technique identifié, il sera nécessaire à la recherche d'apporter des outils pour mieux gérer l'impact de l'environnement sur l'efficacité de la lutte biologique. Plusieurs pistes sont envisageables :

- (1) améliorer la connaissance de l'effet des stress environnementaux sur l'efficacité des agents de lutte biologique existants, pour en limiter l'utilisation aux situations à moindre risque d'échec. Une telle approche a été expérimentée avec succès pour *Trichoderma* en Israël à l'aide du modèle Greenman basé sur des prévisions météorologiques à court terme (Elad & Shtienberg, 1997). Une autre approche pourrait consister à diminuer la fréquence ou la durée de situations de stress, par une maîtrise de l'environnement (envisageable pour les cultures sous abri) et /ou par la protection des agents de lutte biologique à l'aide d'adjuvants dans la formulation des produits.
- (2) Une solution plus durable consisterait à sélectionner systématiquement des agents de lutte biologique dont la survie et l'activité biologique sont moins sensibles aux stress environnementaux (compétence écologique, activité protectrice exprimée le plus rapidement possible ou à distance la plus grande possible de l'agent pathogène, cumul de modes d'action différents). La mise au point de tests de criblage à haut débit pour ce type de sélection nécessiterait une intensification des efforts de recherche en écologie microbienne et dans l'élucidation fine de l'impact environnemental sur divers mécanismes d'action des agents de lutte biologique. De façon alternative, mise en application des progrès de la biotechnologie pourrait permettre à terme l'amélioration génétique de souches microbiennes pour une utilisation directe sur les plantes cibles ou pour leur faire produire des molécules d'intérêt pour la lutte biologique.

L'utilisation des méthodes de lutte biologique doit être envisagée dans un contexte de protection intégrée (Elad & Shtienberg 1995). Ceci suppose une compatibilité de l'ensemble des interventions phytosanitaires entre elles, avec la gestion du climat de la serre ainsi qu'avec le reste des pratiques liées à la production (Decognet *et al.* 1998 ; Hertz *et al.* 2004 ; Jarvis *et al.* 1989 ; Nicot *et al.* 2001, 2003 ; Papadopoulos *et al.* 1997 ; Shtienberg & Elad 1997) La gestion par le serriste de cet ensemble complexe d'interactions pose des difficultés techniques considérables. Des systèmes d'aide à la décision prenant en compte certains de facteurs ont été développés (Boulard *et al.* 2003 ; Clarke *et al.* 1999, Gary & Tchamitchian 2002). Un des challenges de la recherche sera d'affiner la connaissance de ces interactions et de raffiner les systèmes d'aide à la décision pour une agriculture serricole de précision.

4.5. La vigne

La viticulture est une source importante de consommation de pesticides en France. Cette situation tient moins à l'importance des surfaces cultivées (0.860 Mha soit seulement 3,7 % de la SAU) (ONIVINS, 2003), qu'au nombre de traitements phytosanitaires réalisés par unité de surface lors de chaque saison culturale. Ceux-ci sont considérés comme la solution quasi unique au cortège de bio-agresseurs de la culture.

Si l'on comptabilise le nombre moyen d'applications visant chaque bio-agresseur (enquêtes BVA réalisées annuellement pour les firmes), une vingtaine de traitements sont appliqués annuellement. Il s'agit majoritairement de pulvérisations de fongicides (360 €/ha) visant essentiellement deux maladies, l'Oïdium et le mildiou qui à elles seules génèrent 70% des dépenses phytosanitaires. Les insecticides et les herbicides conduisent respectivement à 130 et 150 € de dépenses. Ainsi la vigne utilise-t-elle environ 20% des intrants pesticides nationaux dont 30% des fongicides. Il en résulte pour les exploitations des coûts qui représentent la moitié de leurs charges d'approvisionnement. D'importantes disparités sont toutefois constatées autour de ces moyennes selon les exploitations (ONIVINS 2000).

Cette situation est le fruit d'une suite d'événements historiques majeurs qui ont profondément marqué la viticulture depuis le 19^e siècle, notamment l'introduction depuis les Etats-Unis de plusieurs fléaux destructeurs, l'Oïdium en 1848 (Chute des récoltes de 75% en 3 ans), le Phylloxéra en 1863 (arrachage de tous les vignobles et reconstitution par de nouveaux cépages sur de nouveaux terroirs), le mildiou en 1878 (recherches intensives ayant conduit à la découverte de la bouillie bordelaise en 1885), enfin le Black-rot en 1885 (Galet, 1977). Une issue à ces crises a été rendue possible grâce au greffage de la vigne sur des porte-greffes résistants au Phylloxera et grâce aux premiers produits fongicides que sont le soufre et le sulfate de cuivre. Pour s'en affranchir, des hybrides résistants, dits producteurs directs, ont également été cultivés jusqu'au milieu des années 1950. Ils ont été interdits réglementairement en 1953 (décret 53.977 du 30 septembre) pour cause d'insuffisance qualitative face aux évolutions prévisibles de la demande des consommateurs. On doit donc souligner ici ce qui pourrait être considéré comme une incongruité aujourd'hui : au milieu du 20^e siècle, les pesticides étaient jugés comme des facteurs de durabilité de la culture et la résistance variétale comme un facteur de non durabilité pour cause d'impasse commerciale.

4.5.1. Les bio-agresseurs de la vigne

La liste exhaustive des maladies cryptogamiques, bactériennes ou virales et celle des ravageurs (arthropodes, nématodes) est particulièrement longue (Galet 1977, Pearson 1988). Leur distribution dans le monde est liée principalement à leurs exigences climatiques et à la sensibilité des cépages cultivés. Pour simplifier le propos sans nuire à l'objectif d'analyse, nous réduisons la présentation à ceux qui justifient, par leur potentiel de nuisances, la mise en œuvre de mesures de protection. Nous avons conscience cependant, l'histoire nous l'a montré, que des changements de pratiques ou des introductions inopinées à partir de pays étrangers peuvent conduire à terme à l'émergence de problématiques nouvelles.

Le tableau 4.5-1 présente les différents types de bio-agresseurs selon leur impact agronomique en termes de nuisibilité. Ce classement a été établi sur la base des descriptions des ouvrages de Dubos (1999) et de Stockel *et al* (2000).

4.5.1.1. Agents de pertes de récoltes (groupe 1)

Nous avons classé ici des parasites ou des ravageurs des parties aériennes causant des destructions de grappes et de baies où affectant la production consécutivement à une attaque foliaire (chute ou nécrose du feuillage ou des rameaux ; baisse de photosynthèse donc de la production d'alcool). Viennent s'y ajouter des bio-agresseurs qui obligent à un tri des grappes vendangées pour réduire les conséquences

qualitatives des attaques. Pour l'essentiel, il s'agit de champignons à dissémination aérienne. Face à ces bio-agresseurs, la protection chimique est considérée comme obligatoire par l'ensemble des viticulteurs.

4.5.1.2. Agents responsables de baisses de qualité (groupe 2)

Les bio-agresseurs concernés affectent directement, par les dégâts causés sur grappes, les propriétés organoleptiques ou les composantes de typicité des baies nécessaires à l'élaboration de vins répondant au standard des appellations (taux d'alcool, composition phénolique, tanins, précurseurs d'arômes) (Darriet *et al.*, 2002). Notons que les agents du groupe 1, souvent responsables d'une réduction de la photosynthèse peuvent également contribuer à une baisse de qualité du vin. Dans le groupe 2 nous trouverons essentiellement des agents de pourritures ou de moisissures (La Guerche, 2004) mais aussi des insectes perforateurs des baies pouvant amplifier les effets de ces premiers (Fermaud et Le Menn, 1989). On doit y adjoindre des champignons producteurs de toxines, dangereuses pour la santé humaine (Cabanis, 2000). Ces agents peuvent également conduire à la nécessité de mesures œnologiques correctives (filtration des moûts par exemple) qui alourdissent les coûts d'élaboration des vins. Les bio-agresseurs du groupe 2 ne conduisent à des décisions de traitements pesticides que dans les vignobles d'appellation susceptibles de valoriser la qualité de leurs productions, beaucoup plus rarement dans les productions de vins de table du secteur coopératif.

4.5.1.3. Agents responsables de dépérissements ou de dégénérescence (groupe 3)

Ce groupe est constitué de bio-agresseurs s'attaquant généralement aux organes ligneux et pouvant, dans des délais plus ou moins longs, affecter durablement la croissance, le développement et la production des plantes ou provoquer leur mort. On y trouve des virus ou des phytoplasmes transmis par le matériel végétal lors des opérations de multiplication végétatives et de greffage. Leur contrôle repose surtout sur la sélection sanitaire et la certification par l'ONIVINS des plants produits en pépinières. En culture, ces agents infectieux biotrophiques de type systémique, sans autonomie, peuvent être disséminés par des vecteurs animaux (nématode *Xiphinema index* dans le cas du virus du court-noué par ex.). La lutte doit alors viser ces vecteurs. Elle est rendue obligatoire réglementairement dans certains cas lorsque l'agent pathogène constitue une vraie menace de destruction du patrimoine de production national (phytoplasme de la flavescence dorée transmis par la cicadelle *Scaphoideus titanus* par ex.).

Plusieurs champignons aux propriétés lignivores sont également causes de nécroses internes des souches induisant des dépérissements à évolution plus ou moins lente que l'on nomme communément maladies du bois. Parmi ces dernières, deux sont particulièrement préoccupantes du fait des grandes difficultés à les combattre : l'eutypiose qui se propage, à partir des souches malades, à l'aide de spores pénétrant par les plaies de taille en hiver, et l'esca, syndrome dû à un cortège de parasites (*Phaeoacremonium aleophilum* et *P.Chlamydosporum*, *Eutypa lata* et *Phellinus punctatus*) qui dégradent les tissus ligneux selon une séquence ordonnée mais dont les exigences épidémiologiques ne sont pas encore clairement établies. Cette maladie est en cours d'extension depuis que le seul fongicide connu pour être actif, l'arsénite de sodium, ait été interdit du fait de sa grande toxicité pour l'homme.

Un insecte s'attaquant au cours de son cycle biologique aux racines est également à placer dans ce groupe. Il s'agit de *Viteus vitifoliae* plus communément désigné Phylloxéra. Ce puceron, bien que toujours présent dans la plupart des régions passe aujourd'hui inaperçu du fait de l'utilisation systématique de porte-greffes résistants.

| Bio-agresseurs | | Groupes | | | Distribution | Organes touchés |
|----------------|---|---------|--------|-----|--------------|-----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| Champignons | <i>Plasmopara viticola</i> (Mildiou) | xx | x | | G | F-G |
| | <i>Uncinula necator</i> (Oïdium) | xx | x | | G | F-G |
| | <i>Guignardia bidwellii</i> (Black-rot) | x | | | L | f-G |
| | <i>Pseudopeziza tracheiphila</i> (Brenner) | x | | | L | F |
| | <i>Botrytis cinerea</i> (Pourriture grise) | x | xx | | G | f-G |
| | <i>Penicillium</i> sp (arômes terreux) | | x | | L | G |
| | Complexe de la Pourriture acide (levures + bactéries) | | x | | L | G |
| | <i>Aspergillus ochraceus</i> (production d'ochratoxine A) | | x | | L | G |
| | <i>Phomopsis viticola</i> (Excoriose) | x | | x | G | T |
| | <i>Eutypa lata</i> (Eutypiose) | | | xxx | G | S |
| | Agents du syndrome de l'Esca | | | xxx | G | S |
| | <i>Armillaria</i> sp et <i>Rosselinia</i> sp (pourridié) | | | x | G | R |
| | <i>Cylindrocarpon</i> (pied noir) | | | x | L | R |
| Procaryotes | <i>Xylophilus ampelinus</i> (Nécrose bactérienne) | xx | | | L | F |
| | <i>Agrobacterium tumefaciens</i> (Crown gall) | | | x | L | R |
| | Phytoplasme de la Flavescence dorée | x | | xx | L | S |
| | Phytoplasme du Bois noir (Stolbur) | | | x | L | S |
| Virus | Fan leaf virus (Court noué), panachure | | | x | G | S |
| | Enroulement, marbrure, bois strié | | | x | L | S |
| | Virus divers | | | x | L | S |
| Arthropodes | <i>Lobesia botrana</i> (Tordeuse : Eudemis)) | x | x | | L | G |
| | <i>Eupoecilia ambiguella</i> (Tordeuse : Cochyliis) | x | x | | L | G |
| | <i>Empoasca vitis</i> (Cicadelle des grillures) | | x | | L | F |
| | <i>Scaphoideus titanus</i> | | | V | L | F |
| | <i>Viteus vitifoliae</i> (Phylloxera) | | | P | G | R |
| | Insectes divers : Pyrale, Thrips, Cigarié, Cochenilles, altise, guêpes, drosophiles... | x | | | L | F, g |
| | Acarions - <i>Eotetranychus carpini</i> (Ar. jaune) - <i>Tetranychus urticae</i> - <i>Panonychus ulmi</i> (Araignée rouge) - <i>Calepitrimerus vitis</i> (Acariose) - <i>Eriophyes vitis</i> (Erinose) | | x x | | L | F |
| Nématodes | <i>Xiphinema index</i> (Vecteur du court noué) | | | V | G | R |
| | <i>Meloidogyne arenaria</i> (Nématodes à galles) | | | x | L | R |
| Adventices | Espèces diverses | xx | xx | | G | |

xxx pertes très sévères, xx moyennement graves, x faibles

G : distribution généralisée dans l'ensemble des vignobles ; L : localisée à certaines régions

V : vecteur d'agents pathogènes (virus ou phytoplasme)

P : Affection potentielle mais contrôlée par les mesures préventives en cours

Organes touchés : feuilles (F ou f selon gravité), grappes (G ou g selon gravité), souche (S), racines et collet (R), tiges et rameaux (T)

Tableau 4.5-1. Les bio-agresseurs de la vigne.

Le mode de représentation choisi dans le tableau 1 montre que les bio-agresseurs peuvent également se différencier selon des critères de distribution géographique eu égard à leurs exigences épidémiologiques et de dangerosité. Cette dernière est appréciée selon des critères divers comme les coûts de protection préventive ou curative mise en œuvre (nombre ou coût moyen des traitements / ha, charges de replantations pour les maladies de dépérissement, tris à la vendange, mesures œnologiques correctives...), plus rarement par les pertes effectives de récoltes dans la mesure où les mesures appliquées limitent efficacement les dégâts. Ainsi, la liste descriptive suivante peut être proposée :

- **Bio-agresseurs compromettant la durabilité des souches**

- maladies à virus ou phytoplasmes transmissibles par greffage, dont le développement est lié à l'état sanitaire du matériel de propagation et à l'efficacité de la lutte contre les vecteurs.
- maladies du bois présentes dans tous les vignobles, à évolution lente, affectant différemment les cépages et s'exprimant plus ou moins selon l'historique cultural des parcelles : eutypiose, esca ;
- maladie de nécrose bactérienne s'attaquant à tous les organes aériens, restreinte géographiquement aux vignobles des Charentes et du Roussillon ;
- maladies du collet ou des racines, ponctuellement destructrices : les pourridiés ;
- maladie de nécrose des rameaux, l'excoriose, présente en toutes régions mais aux conséquences limitées et progressant avec lenteur (un seul cycle annuel de reproduction).
- le Phylloxera, pour mémoire.

- **Maladies du feuillage et des grappes**

- maladies épidémiques majeures à typologie polycyclique présentes en toutes régions et sévissant avec plus ou moins de gravité chaque saison selon les conditions climatiques : mildiou et oïdium sur feuilles et grappes, pourriture grise sur grappes ;
- maladies fongiques à distribution géographique plus limitée, mais pouvant localement être très dommageable, le black-rot dans les vignobles atlantiques surtout (parasite polycyclique à longue période de latence) et le brenner (rougeot parasitaire) dans les vignobles septentrionaux (parasite monocyclique);
- maladies de pourriture des grappes pouvant être graves localement, souvent liées à l'état de maturation des baies et au type de cépage : pourriture acide, Aspergillus et Penicillium (production de toxines ou de géosmine conférant des arômes terreux).

- **Ravageurs animaux**

- insectes dont les larves s'attaquent aux baies, plus ou moins nuisibles selon les années ou selon le nombre de générations (2 ou 3) et qui favorisent l'installation de pourritures, inféodés localement à certains vignobles, l'Eudemis dans les régions méridionales et la Cochyliis, plutôt dans les régions septentrionales.
- insectes divers, pouvant ponctuellement inquiéter par leurs dégâts mais dont les conditions de nuisibilité ne sont pas encore clairement démontrées : cicadelle verte ou des grillures, cochenilles, thrips, altises, cigarier, Pyrale, etc. ;
- acariens du feuillage, présents en toutes régions sur le feuillage dont les populations sont étroitement dépendantes de la présence de populations prédatrices préservées par les traitements sanitaires dont les pullulations (7-8 générations / an) peuvent engendrer des baisses de photosynthèse et des taux de sucre dans les moûts.

4.5.2. Les pratiques actuelles

4.5.2.1. Cadre général

Si l'on devait caractériser le trait essentiel de la lutte contre les bio-agresseurs de la vigne, une mention particulière devrait être réservée à la protection chimique du fait du choix quasi exclusif qui en est

fait face aux agents les plus dangereux potentiellement, qu'il s'agisse d'insectes ou de champignons parasites, à l'exclusion des affections virales qui justifient une sélection sanitaire et une certification des plants. Les procédés de lutte biologique sont appliqués exclusivement aux ravageurs et les interventions culturales aux vertus préventives ne sont souvent retenues qu'en complément des approches précédentes pour en renforcer l'efficacité. Cette situation de dépendance de la culture vis-à-vis des pesticides est la conséquence de plusieurs facteurs :

- l'absence de solutions génétiques : les variétés de *Vitis vinifera* ne possèdent pas de gènes de résistance. Elles ne présentent seulement que des différences de sensibilité. Les sources de résistance disponibles aujourd'hui sont présentes chez diverses espèces de *Vitis* d'origine américaine (Bouquet *et al*, 2001) et des clones d'hybrides interspécifiques interdits de culture par la réglementation pour produire du vin mais autorisés pour une utilisation comme porte-greffes du fait de leur résistance au Phylloxéra (Pouget 1990).
- l'industrie phytosanitaire propose une gamme particulièrement diversifiée de substances actives homologuées (45 substances actives insecticides ou acaricides, 44 fongicides, 23 herbicides selon le site officiel e-phy du ministère de l'agriculture). Ces molécules apportent des solutions efficaces à la plupart des pathologies fongiques ou des dégâts de ravageurs, à l'exception des maladies du bois, notamment l'esca qui demeure sans solution depuis le retrait de l'arsénite de sodium ;
- la production de vendanges saines est considérée comme une des conditions essentielles posée par les œnologues pour produire des vins de qualité répondant aux demandes du marché ; Cette condition est souvent interprétée comme une exigence de seuil de tolérance 0 à l'égard des bio-agresseurs, ce qui est évidemment discutable car elle conduit à des interventions de précaution parfois inutiles. Ces dernières sont justifiées par la forte aversion aux risques des viticulteurs face aux impacts potentiels des maladies sur les rendements ou la qualité (mildiou, oïdium, black-rot, pourriture grise).

Aucune solution vraiment alternative ne permet aujourd'hui d'assurer une protection aussi efficace que les produits phytosanitaires contre les maladies. Contre ces dernières, il n'existe pas de procédés homologués de lutte biologique et les pratiques culturales à effet préventif ne sont recommandées qu'en complément des procédés chimiques. Contre les ravageurs ou les mauvaises herbes, la situation est cependant toute différente. La forte valeur ajoutée au produit transformé, le vin, autorise par ailleurs des dépenses de protection relativement élevées comparativement aux grandes cultures et autorise la réalisation de traitements nombreux. Il est particulièrement édifiant de constater à partir d'enquêtes chez les viticulteurs que le nombre moyen d'applications n'est pas proportionné aux risques objectifs (évalués selon les avertissements agricoles des SRPV par ex.) mais dépend plutôt du prestige de l'appellation, c'est-à-dire du prix de vente du vin, or, ces exploitations disposent souvent d'un encadrement technique de haut niveau qui pourrait mieux optimiser les programmes de protection. Dans une majorité d'exploitations ces programmes sont conduits selon une stratégie d'assurance reposant sur des applications prédéterminées à des stades phénologiques donnés avec des produits achetés en morte saison. Ces pratiques favorisent largement la sélection de souches fongiques résistantes aux principales familles de fongicides découvertes au cours des 25 dernières années (Clerjeau, 1994) et la présence de résidus inutiles dans les vins bien que, selon les enquêtes (Bruchet et Cugier, 2000) ceux-ci soient inférieures aux LMR réglementaires dans plus de 95 % des cas. Leur présence inquiète cependant de plus en plus le négoce et le secteur de la distribution.

4.5.2.2. Lutte contre les maladies

Les méthodes de protection mises en œuvre sont très segmentées par types d'agents pathogènes :
Contre les agents transmis par greffage (virus, phytoplasmes), une sélection sanitaire et une certification des plants est mise en œuvre et conduit à minimiser les interventions en culture. Ainsi, dans les parcelles infestées de nématodes virulifères, une désinfection à l'aide de fumigants peut-être pratiquée si le délai entre arrachage des vignes virosées et nouvelles plantations (5 à 6 ans en moyenne) est insuffisant. Dans le cas de dégâts de flavescence dorée (phytoplasme parasite de quarantaine), il pourra être procédé à un arrachage des plantes malades et une lutte chimique contre la cicadelle vectrice.

Contre les champignons lignicoles responsables de dépérissements, qu'aucune lutte fongicide curative ne permet de combattre avec efficacité, la destruction des plantes malades est recommandée. Le recépage des vignes atteintes d'eutypiose et le traitement préventif des plaies de taille des jeunes plantations est également pratiqué.

Contre les champignons s'attaquant aux feuilles et aux grappes, la protection chimique est de règle : les pratiques habituelles reposent sur des programmes visant systématiquement le mildiou et l'Oïdium. Le nombre de traitements est modulé selon les conditions climatiques, grâce aux avertissements agricoles des SRPV ou aux conseils de l'ITV (Institut Technique de la Vigne et du Vin) établis à partir de réseaux d'observation des maladies sur le terrain et certains modèles prédictifs (mildiou uniquement) largement perfectibles : modèles MILVIT, EPI, Potentiel Systems par ex. (Clerjeau, 1996). Les fongicides utilisés sont choisis pour agir simultanément contre le black-rot ou le Brenner dans les régions concernées par ces maladies aussi, les traitements spécifiques contre celles-ci sont-ils rares. Les interventions contre la pourriture grise sont découplées des précédentes. Elles font appel à des fongicides spécifiques visant les grappes exclusivement dans les vignobles susceptibles de valoriser la qualité du raisin, en raison du coût élevé des molécules actives. Afin d'améliorer le positionnement des applications ou mieux évaluer leur opportunité, plusieurs indicateurs de décision sont en cours de validation. Ces derniers font appel à la modélisation des risques climatiques ou à des mesures de l'état de réceptivité des baies (Fermaud *et al*, 2002, 2003). Aucune décision de traitement ne tient compte aujourd'hui de seuils d'interventions fautes de données scientifiques sur les fonctions de dommages engendrés par les maladies.

A ces interventions de base, viennent s'ajouter des pratiques culturales compatibles avec celles qui sont recommandées pour atteindre des objectifs qualitatifs (normes AOC par ex.). Ces mesures sont considérées comme facteurs de minimisation des risques épidémiques, de renforcement de l'efficacité de la protection chimique, mais rarement comme des méthodes de substitution à cette dernière. Nous pouvons citer ici les mesures visant à réduire la vigueur des plantes (fertilisation azotée minimum, enherbement concurrentiel) qui conduisent à réduire les taux de progression de la plupart des maladies et des ravageurs (Delas *et al*, 1982, Fermaud *et al* 1994), les rognages et effeuillages qui favorisent l'exposition des grappes au rayonnement et diminuent ainsi les risques de pourriture des grappes (Fermaud *et al*, 2001).

4.5.2.3. Lutte contre les insectes et acariens

La protection contre les ravageurs se situe au second plan des préoccupations principales des viticulteurs en raison du potentiel de destruction moindre que constituent ces bio-agresseurs par rapport aux maladies, à deux exceptions près : le phylloxéra et le vecteur de la flavescence dorée (FD), *S. titanus*. Le premier problème est, pour sa part, résolu par l'utilisation de porte-greffes résistants, seul exemple de résistance génétique considéré indispensable à la culture. Pour l'avoir négligé, les viticulteurs de la Napa Valley californienne ont dû totalement arracher leur vignoble au cours des années 1990 pour le reconstituer avec des porte-greffes résistants (de Benedictis et Granet, 1993). Le second problème impose l'obligation de 2 ou 3 interventions chimiques destinées à circonscrire l'extension des foyers de FD en complément de l'arrachage des vignes malades.

Hors de ces cas, la protection contre les ravageurs a pour cible les tordeuses des grappes (Eudemis ou Cochylys selon les vignobles concernés). Lorsqu'elle fait appel aux insecticides, ces derniers sont appliqués en tenant compte du déroulement des générations des insectes, des dates d'apparition des larves et de seuils d'interventions, à raison de 1 à 2 applications en moyenne. Leurs effets sur les autres ravageurs permettent de ne pas envisager de traitements spécifiques contre ces derniers (cicadelles des grillures par ex.).

Depuis 1995, une méthode biotechnique de lutte est mise en œuvre contre les tordeuses, la confusion sexuelle à l'aide de phéromones de synthèse. Cette technique développée grâce aux travaux réalisés à l'INRA (Stockel et Lecharpentier, 1994) est performante mais sensiblement plus onéreuse que la protection insecticide et ne peut concerner que des parcelles de grande taille, supérieures à 10 ha. Elle n'est appliquée que sur 12 000 ha actuellement selon les sources de BASF, société qui commercialise les diffuseurs de phéromones.

La protection contre les diverses espèces d'acariens a longtemps été envisagée sous un angle strictement chimique. Cette pratique a conduit à une généralisation de populations résistantes aux insecticides de synthèse et à développer de nouvelles approches. Actuellement, des pulvérisations de soufre peuvent être appliquées ponctuellement, en début de croissance de la vigne, contre les Eriophyides (acariose) mais en cours de saison, les traitements acaricides spécifiques ont pratiquement été abandonnés au profit d'une régulation naturelle des populations de Tétranyques reposant sur la préservation des populations d'acariens phytoséides prédateurs (*Typhlodromus pyri*, *Kampimodromus aberrans*, *Amblyseius andersoni* notamment). Cette démarche repose sur la nécessité de n'utiliser, pour la couverture chimique du vignoble, que des pesticides à effets neutre ou faiblement toxiques sur les acariens prédateurs (Kreiter *et al*, 1993). Cet objectif est largement compromis dans les parcelles soumises à une obligation de lutte contre *S.titanus*, vecteur de la FD (Coulon et Sentenac, 2001).

En conclusion, la lutte contre les ravageurs animaux fait apparaître des applications non négligeables de protection biologique ou biotechnique, ce qui est un point de différenciation majeure avec les maladies. Leur mise en œuvre est facilitée par la fixation de seuils de nuisibilité et d'intervention ainsi que de procédures d'observations et d'échantillonnages assez couramment appliquées par les techniciens conseillers des viticulteurs.

| Principales méthodes de lutte | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| Principaux groupes de bio-agresseurs | | Nb trait. | | | | |
| Champignons | Mildiou | 5-7 (E) | - | - | - | x (e) |
| | Oïdium | 5-7 (E) | - | - | - | x (e) |
| | Black-rot | 0-2 (sp) (E) | - | - | - | - |
| | Brenner | 0-2 (sp) (E) | - | - | - | - |
| | Excoriose | 0-2 (E) | - | - | - | - |
| | Pourriture grise | 0-3 (e) | - | - | - | xx (E) |
| | Eutypiose | 0-1 (e) | - | - | xx (E) | xx (E) |
| | Esca | - | - | - | x (e) | - |
| | Pourridié | x (e) | - | - | x (e) | - |
| Bactéries | Nécrose bactérienne | 2-3 (e) | - | - | - | xx (e) |
| Virus (cf. nématodes) | Court noué (vect) Enroulement | | Sélection sanitaire (E) | - | x | - |
| Phytoplasmes | Flavescence (vect) | 2-3 (E) | - | - | xxx (e)* | - |
| | Bois noir | - | - | - | xxx (e)* | x (e) |
| Acariens | Araignées rouge et jaune Acariose | 0-2 (e) | - | xxx (E) | - | - |
| Insectes | Eudemis | 0-3 (E) | - | xx (E) | - | - |
| | Cochylis | 0-3 (E) | - | xx (E) | - | - |
| | Cicadelle verte | 0-1 (E) | - | x (e) | - | - |
| | Scaphoïdeus | 3 (E) * | - | - | - | - |
| | Phylloxéra | 0 | xxx (E) | - | x (e) | - |
| | Autres insectes | | - | - | - | - |
| Nématodes | Xiphinema | x (Désinf. sol) (e) | x (e) | - | - | x |
| Adventices | Espèces diverses | 1-3 (E) | - | - | x (e) | xx (E) |
| Autres* | | | | | | |

Lutte chimique : sp = traitements spécifiques

Mise en pratique : limitée (x), modérée (xx), importante (xxx), aucune (-)

Efficacité : partielle (e), satisfaisante (E)

* : traitements réglementaires obligatoires (cas du Scaphoïdeus vecteur de la Flavescence dorée)

Tableau 4.5-2. Efficacité des méthodes de lutte contre les maladies de la vigne.

4.5.2.4. Protection intégrée

Dans les paragraphes précédents, les différentes méthodes de protection ont été décrites sans considérer les démarches mises en œuvre par un nombre de viticulteurs encore faible (5% au dire des experts de l'ITV) mais en accroissement, visant une production intégrée de raisins et faisant appel à un usage raisonné des pesticides. Dans la mesure où la protection intégrée (IPM) s'inscrit dans une approche globale qui doit être considérée comme une alternative aux pratiques actuelles, celle-ci sera développée dans le chapitre suivant. Nous tenons cependant à préciser ici que la profession viticole dispose d'ores et déjà d'un référentiel technique national élaboré par l'ITV et l'ONIVINS (Coulon, 2000), adapté d'une directive de l'OILB (Anonyme, 1999) émanant d'une somme d'expériences acquises dans divers pays européens, notamment en Suisse.

4.5.3. Les alternatives

La question des alternatives à la protection chimique peut être abordée sous plusieurs angles d'approche :

- la possibilité de substituer aux traitements pesticides des traitements à l'aide de préparations biologiquement actives, d'origine généralement naturelle, sans impacts reconnus sur l'environnement ou la santé, pouvant conduire à une suppression ou une limitation des applications de pesticides sans remettre en cause profondément les pratiques culturales.
- les perspectives de mise en œuvre de systèmes culturaux moins vulnérables aux bio-agresseurs donc moins dépendants des pesticides.
- les conditions d'acceptabilité de leur mise en œuvre donc les freins éventuels à leur diffusion, sachant que la vigne est une culture qui, à la différence de nombreuses autres, est fortement contrainte par les normes des AOC et dont les pratiques ne peuvent conduire à des effets susceptibles de déprécier la qualité de ses produits. Cet aspect est hors du champ du chapitre 4.

4.5.3.1. Procédés innovants

a) Méthodes génétiques (variétés résistantes)

L'absence de gènes de résistance exploitables chez *Vitis vinifera* pose nécessairement la question de l'avenir d'éventuelles variétés résistantes issues d'OGM ou d'hybrides interspécifiques puisque, en l'état des réglementations en vigueur, elles ne pourraient être acceptées. Certains gènes conférant une résistance de haut niveau, comme le gène *Rum* de résistance à l'oïdium mis en évidence chez *Muscadinia rotundifolia* possède un déterminisme monofactoriel qui permet d'envisager une introgression dans les variétés sensibles de *V. vinifera* comportant un minimum de "pollutions alléliques" provenant du parent résistant (Bouquet *et al*, 2000, 2001). On doit cependant s'interroger sur la durabilité d'un tel gène dans un système de culture pérenne sachant que l'oïdium est un parasite de type polycyclique, à forte variabilité et disséminable à longue distance (Rapilly, 1991). En revanche, l'amélioration des porte-greffes demeure ouverte. Les programmes en cours visent plusieurs objectifs : la résistance au virus du court noué (GFLV) ou son vecteur *X.index*, la résistance à certains facteurs abiotiques (chlorose ferrique) enfin, la réduction de la vigueur conférée au greffon pour diminuer la sensibilité aux maladies et accroître la qualité du raisin (Cordeau, 1998). Les méthodes utilisables dans ce cas n'excluent pas *a priori* la transgénèse (Walter et Soustre-Gacougnon, 2001).

b) Méthodes biologiques

. Cas des champignons

Il n'existe que peu d'applications actuelles de la lutte biologique sur vigne en France (Silvy et Riba, 1999) puisque la première homologation (provisoire et sous réserve de compléments de résultats d'efficacité) vient d'être accordée à une bactérie antagoniste, *Bacillus subtilis* pour la protection des grappes contre la pourriture grise. Des recherches en cours visent à développer :

- d'autres micro-organismes antagonistes ou hyperparasites : *Trichoderma sp.*, *Ulocladium atrum*, contre *Botrytis cinerea*, *Ampelomyces quisqualis* et *Reynoutria sachalinensis* contre l'oïdium (Marrone, 1999, Roudet et Dubos, 2000) ;
- des préparations issues de micro-organismes comme le chitosan (Amborabe et Aziz, 2004), des extraits aqueux de plantes (graines de Fenugrec) ou d'algues (laminarine) (Aziz et Poinssot, 2003), à propriétés élicitrices des systèmes de défense naturelles des plantes comme la production de viniférines qui sont des phytoalexines à propriétés fongicides (Daire et Poinssot, 2002).

Ces micro-organismes ou ces préparations apportent des niveaux de protection généralement partiels, inconstants et dépendants des conditions de milieu. Plusieurs facteurs contribuent à la lenteur de leur mise en œuvre dans la pratique : le faible intérêt des industriels de la phytopharmacie pour cause de marché réduit (celui-ci reste ouvert à des développeurs peu familiers des procédures d'homologation), l'insuffisance des connaissances permettant de définir le contexte de pratiques culturales susceptible de valoriser l'effet de ces procédés. Enfin et surtout, le point de comparaison avec l'efficacité des traitements chimiques reste un point critique pour les utilisateurs.

. Cas des ravageurs

De très nombreuses espèces auxiliaires d'insectes et d'acariens pouvant s'attaquer aux ravageurs de la vigne ont été décrites, cependant, les seules méthodes de lutte biologique homologuées ou appliquées en viticulture concernent l'utilisation des typhlodromes contre les acariens phytophages et les thrips (Kreiter *et al*, 1989) ainsi que l'application d'une bactérie, *Bacillus thuringiensis* contre les tordeuses de la grappe (*L.botrana* et *E.ambiguella*). Appliquée avant les premières éclosions des larves de *L.botrana*, cette dernière technique apporte des résultats très satisfaisants (Roehrich et Boller, 1991). L'ensemble des travaux de recherches réalisés sur la possibilité d'appliquer une lutte biologique par inondation ou augmentation de diverses espèces (trichogrammes contre les tordeuses, *Anagrus atomus* contre la cicadelle verte) n'a pas permis jusqu'alors d'apporter des résultats concluants pour diverses raisons : manque de synchronisation entre les cycles du phytophage et de son ennemi, niveau d'efficacité insuffisant, difficultés de production des insectes (Rossi, 1993) .

Comme alternative à la lutte chimique qui aujourd'hui ne vise principalement que les tordeuses, la technique de confusion sexuelle est la plus séduisante. Les conditions de valorisation et les contraintes de cette méthode sont aujourd'hui bien caractérisées. Certaines limites demeurent cependant à préciser, comme les risques d'adaptation à long terme du comportement des insectes et l'impact de l'abandon des traitements insecticides sur l'émergence de ravageurs secondaires par ex. Les suivis à long terme réalisés dans les vignobles qui ne sont plus soumis aux traitements semblent cependant plutôt indiquer une régulation naturelle des populations d'insectes et acariens ravageurs par la présence du cortège des ennemis naturels généralistes ou spécifiques inféodés au vignoble ou à la végétation périphérique (Delbac *et al*, 1996). Cet équilibre peut toutefois être rompu dans les vignobles soumis à la lutte chimique obligatoire contre *S.titanus*, le vecteur de la Flavescence dorée (Kreiter 2000).

En résumé, si l'on exclut l'impasse que constitue le problème du phytoplasme de la FD, nous disposons aujourd'hui des outils permettant de protéger la vigne contre les ravageurs sans faire appel aux insecticides. Pour faire face à la difficulté due à la FD, des travaux sont menés pour évaluer les possibilités de développer une lutte biologique par acclimatation d'insectes parasites issus de l'aire d'origine de la cicadelle, la zone des grands lacs américains, afin de réduire le risque d'extension du phytoplasme. Les résultats ne sont que préliminaires (Malusa, 2000).

Pour le long terme, deux types de recherches susceptibles d'étendre le champ des méthodes alternatives sont poursuivis. Celles-ci concernent d'une part la possibilité de mettre en œuvre une stratégie "Push & Pull" qui est une méthode de "confusion de ponte" contre les tordeuses visant à rendre les grappes dissuasives pour la ponte tout en organisant des leurres de ponte hors des pieds de vigne (Thiéry *et al*, 2002 ; Maher *et al*, 2000). D'autre part, dans le cadre d'une production viticole très intégrée, incluant la dimension du paysage et la gestion de la biodiversité, des études sont menées pour évaluer la possibilité de réguler les populations de ravageurs en interaction avec celles de leurs ennemis naturels, à l'aide de zones écologiques réservoirs, de haies arbustives ou de bandes enherbées (Van Helden, 2001).

| Principales méthodes de lutte | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| Principaux groupes de bio-agresseurs | | | | | | |
| Champignons | Mildiou | +++ | - | - | - | + |
| | Oïdium | +++ | - | - | - | + |
| | Black-rot | +++ | - | - | - | - |
| | Brenner | ++ | - | - | - | - |
| | Excoriose | + | - | - | - | - |
| | Pourriture grise | + | - | - | - | ++ |
| | Eutypiose | + | - | + | + | ++ |
| | Esca | - | - | - | + | + |
| | Pourridié | + | - | + | + | + |
| Bactéries | Nécrose bactérienne | + | - | - | - | + |
| Virus | Court noué (cf. nématodes) | - | ++ | - | - | - |
| Phytoplasmes | Flavescence dorée (cf. Scaphoïdeus) | - | - | - | - | - |
| Acariens | Tétranyques | + | - | +++ | - | + |
| | Acariose, Erinose | ++ | - | - | - | + |
| Insectes | Eudemis, Cochylis | + | - | ++ | - | ++ |
| | Cicadelle verte | - | - | + | - | ++ |
| | Scaphoïdeus (vecteur FD) | +++ | - | + | - | - |
| | Autres insectes | - | - | + | - | + |
| Nématodes | Xiphinema (vecteur virus) | + | + | - | - | ++ |
| Adventices | Espèces diverses | ++ | | - | - | ++ |

Tableau 4.5-3. Méthodes de lutte alternatives (futures ou potentielles) contre les maladies de la vigne.

4.5.3.2 Pratiques culturales préventives

Les choix culturaux en viticulture sont très généralement déterminés par des objectifs stratégiques. Les choix variétaux, les densités de plantation et les systèmes de taille par exemple sont généralement guidés par des objectifs de production qui sont contraints par les systèmes d'AOC (Roby et Van Leeuwen, 2001). Même s'ils conduisent à des niveaux de réceptivité variables aux bio-agresseurs et donc peuvent déterminer des niveaux de dépendance différenciés aux pesticides, ils ne sont pas décidés en fonction de ce dernier critère. En revanche, au sein d'un système contraint donné, des marges d'action existent dans les pratiques culturales utilisables. Certaines d'entre elles ont été identifiées et sont mises en œuvre comme facteurs de minimisation des risques.

Action sur les inoculum primaires

Les méthodes visant à réduire l'inoculum primaire sont potentiellement intéressantes contre les bio-agresseurs effectuant un cycle annuel ou pluriannuel. Ces cas de figure sont minoritaires en viticulture. Les actions les plus courantes consistent le plus souvent en des opérations d'élimination des plantes malades difficilement assimilable à une technique culturale mais plutôt à de la prophylaxie. L'exemple type est celui de la lutte contre l'eutypiose (maladie de dépérissement due à *E.lata*) dont la source de conservation se situe au niveau des écorces des souches malades. Le couplage de la prophylaxie avec une taille d'hiver tardive, alors que les plaies de taille sont peu réceptives aux contaminations primaires comparativement à une taille précoce, est une pratique reconnue pour réduire les risques (Lecomte *et al.*, 1999).

Pour les champignons se conservant hors des souches, dans les feuilles mortes par exemple, des opérations lourdes d'élimination des feuilles en hiver ne pourraient se justifier que par une nuisibilité économique élevée du pathogène, ce qui n'est pas le cas de *Pseudopeziza tracheiphyla* seul champignon de type monocyclique ayant un mode de survie foliaire en hiver (Dubos, 2000). L'intérêt

de la destruction des feuilles mortes a souvent été évoqué quant à ses effets possibles sur le mildiou. La méthode n'a cependant pas été évaluée en pratique en raison du caractère polycyclique du parasite qui réduit en théorie son impact prévisible. En revanche, pour freiner les épidémies de ce parasite et retarder les premières interventions fongicides, un épamprage précoce pour éviter la formation des foyers primaires sur la végétation basse et un drainage des parcelles pour supprimer les mouillères favorables à la formation de ces foyers sont conseillés. En fait, comme souvent en viticulture, ces pratiques utiles pour la protection sont mises en œuvre dans la mesure où elles ont d'autres justifications agronomiques, faciliter la pénétration d'engins mécaniques dans les parcelles par ex. dans le cas de la suppression des mouillères (Lafon et Bulit, 1981).

Réduction du taux de croissance épidémique

Diverses opérations culturales agissant directement sur l'hôte et indirectement sur le milieu (microclimat au niveau des organes sensibles) sont susceptibles de modifier la dynamique épidémique des bio-agresseurs de type polycyclique et d'en réduire les impacts économiques. Il peut s'agir :

- de techniques mises en œuvre classiquement pour conduire la culture indépendamment de leur incidence sur les bio-agresseurs : type de taille (modification de l'architecture du végétal), rognages et ébourgeonnages (réduction de la biomasse foliaire sensible au mildiou ou à l'oïdium) ;
- de techniques appliquées spécifiquement pour réduire le développement des bio-agresseurs : effeuillage de la zone des grappes contre *B.cinerea* par ex. permettant une meilleure pénétration du rayonnement dans la zone des grappes et une moindre humidité relative au niveau des baies ;
- de techniques visant conjointement les deux objectifs. Nous pouvons mentionner ici le cas de l'enherbement qui peut contribuer à réduire les risques d'érosion et de compaction des sols mais aussi la vigueur des vignes (par effet de concurrence pour les ressources en eau ou azote) et ainsi permettre de mieux maîtriser les rendements (facteur de qualité) tout en créant un microclimat moins propice au *B.cinerea*. Plusieurs résultats expérimentaux montrent que le facteur vigueur maîtrisée peut conduire à une moindre dépendance aux traitements phytosanitaires contre la pourriture grise (Dubos, 2000) et un moindre développement des attaques de mildiou ou d'oïdium sur le feuillage.

Il est difficile aujourd'hui d'attribuer aux procédés culturaux un impact suffisant pour conduire à une réduction très sensible des pesticides appliqués en viticulture, à l'exclusion probablement des anti-Botrytis (économie potentielle maximum de 1 ou 2 traitements). Elles sont considérées comme des pratiques pouvant venir améliorer le niveau de protection espéré, dans le cadre d'une couverture chimique, notamment lors des années à forte pression de maladie. Une marge de valorisation reste cependant possible si l'on peut montrer en quoi et dans quelles conditions une pratique donnée peut autoriser une réduction du nombre d'applications voire la substitution de certains d'entre eux par des préparations biologiques ou bio-pesticides. Il s'agit d'un domaine de recherches à développer : quelles variables d'état du système jouant comme indicateur de décision modifie-t-on par une technique donnée? Sur quelles bases arbitrer entre plusieurs décisions stratégiques possibles impliquant à la fois des objectifs de production, de qualité, de respect de l'environnement et d'optimisation économique ?

4.5.3.2. Perspectives de l'IPM en viticulture

Deux objectifs majeurs caractérisent l'IPM en viticulture : réduire la sensibilité de la culture aux bio-agresseurs et corrélativement celle de l'utilisation des pesticides au strict nécessaire.

Depuis une trentaine d'années des expériences sont conduites dans différents pays européens pour développer des méthodes alternatives à la lutte chimique, en préciser l'intérêt et les limites. Elles ont donné lieu à des échanges dans le cadre du groupe de travail vigne de l'OILB / SROP (Boller 2003). Les innovations se sont avérées plus nombreuses dans le cas de la lutte contre les ravageurs que contre les maladies. La compilation des résultats a abouti, en 1999, à la rédaction d'une directive de l'OILB concernant la production intégrée de raisin (Anonyme, 1999). Cette directive précise que l'IPM en viticulture n'est pas une pratique en soi mais que son cadre est celui d'une approche globale et cohérente de la production. Cette dernière doit viser à promouvoir une viticulture respectueuse de l'environnement, économiquement viable et soutenant la multifonctionnalité de l'agriculture dans ses aspects sociaux, culturels et récréatifs. A ce titre, elle considère à la fois :

- la nécessité d'une production de raisins sains, de qualité et possédant un minimum de résidus,
- la santé des producteurs manipulateurs de pesticides,
- la diversité biologique de l'écosystème viticole et de ses alentours,
- l'utilisation de toutes les ressources et mécanismes de régulation naturelle,
- l'équilibre des sols à long terme,
- la minimisation de la pollution des eaux, du sol et de l'air.

La traduction de ces objectifs en pratiques de protection se situe dans la directive OILB à divers niveaux :

- définir une liste limitative des bio-agresseurs à combattre, des antagonistes naturels à privilégier, des mesures culturales et prophylactiques à mettre en oeuvre,
- estimer les risques (avertissements agricoles, niveau de sensibilité variétale, seuils de risques, modèles prédictifs),
- préférer les procédés de lutte biologique ou biotechniques à la lutte chimique,
- établir un choix raisonné de produits phytosanitaires (faible toxicité pour l'homme, faibles risques de résistance, faibles impacts non intentionnels sur les organismes utiles, la qualité, la pollution des milieux ou les opérations de transformation technologique),
- améliorer les techniques et le matériel de pulvérisation (limitation des impacts sur l'homme et l'environnement).

Depuis sa parution, la directive OILB a été traduite ou adaptée dans la plupart des pays producteurs de vin européens. En France, en 2000, elle a servi de base à la rédaction du référentiel technique national ITV-ONIVINS pour la production intégrée de raisins. Il s'agit donc d'un référentiel ICM.

Le référentiel technique ITV-ONIVINS

Le référentiel fixe un ensemble d'objectifs minimum destinés aux viticulteurs et pouvant être atteints à moyen terme par paliers successifs. Il est sensé constituer de fait un état du savoir faire en termes de gestion des vignobles eu égard à la maîtrise des impacts environnementaux de la production viticole. Il peut servir de base à divers cahiers des charges régionaux et être un outil d'aide et de réflexion pour des viticulteurs souhaitant souscrire des contrats de développement durables. Il est validé par les CRARQUE dans le cadre des opérations de qualification des exploitations au titre de l'agriculture raisonnée. A la différence de la directive OILB, il n'exclut pas de recourir, à titre dérogatoire, à certaines pratiques présentant des risques écologiques identifiés, en cas d'impasses techniques, face à certains risques majeurs (application de nématicides dans les sols contaminés par *Xiphinema index* en cas de présence avérée du GFLV par ex.). Le référentiel est décliné dans les différentes régions de production après adaptation aux spécificités locales. Il est complété pour les viticulteurs élaborateurs de vins par un référentiel technique de pratiques oenologiques intégrées.

L'ITV a élaboré un outil de diagnostic d'exploitation qui permet de situer les pratiques du viticulteur engagé dans une démarche IPM, par rapport aux exigences du référentiel. La démarche s'est largement inspirée de celle élaborée en Champagne par le CIVC (Anonyme, 2001) pour mettre en œuvre le référentiel technique AOC Champagne Viticulture raisonnée. Il s'agit d'une grille de saisies d'informations qualitatives ou quantitatives portant sur des indicateurs de comportement, d'équipements ou de consommation d'intrants répartis dans plusieurs chapitres d'importance équivalente (protection intégrée, méthodes de pulvérisation, effluents et déchets par ex.). Pour chaque chapitre, l'objectif PI correspond à la somme des engagements demandés et l'évaluation permet de préciser, en pourcentage, la part de l'objectif rempli par rapport à l'objectif fixé.

Les actions d'accompagnement visant à promouvoir l'IPM portent sur une évaluation des contraintes ou des difficultés de sa mise en œuvre dans un ensemble de fermes de références au plan technique et économique (Coulon 2002).

| Objectifs | | Exemples d'engagements | Exemples de recommandations |
|---|--|--|---|
| Formation des viticulteurs | - Qualification professionnelle - Sensibilisation | Stages | Travail en groupes |
| Préservation de l'environnement viticole | - Biodiversité floristique et faunistique - Pollution des milieux | Zones écologiques réservoirs (5% SAU) | Dispositifs enherbés Haies |
| Plantation du vignoble | - Préservation à long terme des terroirs | - Matériel végétal certifié - Dévitalisation des souches court-nouées - Délai d'1 an avant plantation | Diversification des clones, cépages et porte-greffes |
| Entretien des sols | - Prévention de l'érosion et de la compaction - Minimisation des pollutions | - Pas de désherbage chimique généralisé - Enherbement des tournières et contours de parcelles | Couverture végétale hivernale Travail mécanique du sol, enherbement partiel ou total, mulching |
| Gestion du sol et de sa fertilité | - Préservation de la structure des sols, de la faune et la microfaune - Recyclage de la matière organique | - Fertilisation minérale limitée au strict nécessaire - Restitution de la matière organique | |
| Irrigation | - Prévention du lessivage des éléments fertilisants | Contrôle de la qualité de l'eau | |
| Travaux en vert et sur souches | - Prophylaxie - Equilibre de la croissance | - Taille équilibrée - Aération de la zone fructifère | |
| Protection intégrée | - Réduction de la sensibilité des plantes - Réduction des intrants au strict nécessaire - Régulation naturelle des bio-agresseurs - Réduction des risques utilisateurs de pesticides - Réduction de la pollution des milieux | - Prophylaxie - Avertissements agricoles - Suivi biologique des bio-agresseurs - Seuils de tolérance - Outils de prévisions des risques - Favoriser la faune auxiliaire - Choix des produits - Pulvérisation si absolue nécessité | Minimisation des résidus : pas d'utilisation de pesticides à l'approche de la récolte |
| Manipulation des produits phytosanitaires, effluents et déchets | - Limiter les risques - Eviter les pollutions ponctuelles | - Equipements de protection individuelle - Normes des locaux de stockage - Bonne gestion des emballages vides - Pas de manipulations près des points d'eau | Aire de remplissage et de lavage des produits |
| Qualité et sécurité de la pulvérisation | - Réduction des pollutions diffuses - Sécurité des applicateurs | - Diagnostic et étalonnage pulvérisateur - Cuves de rinçage - Calcul des quantités de bouillie à pulvériser | - Ajuster les doses à la surface végétale - Applications face par face |
| Traçabilité, contrôles, agrément | - Mémoire des opérations - Auto-évaluation | - Cahier de suivi technique | - Coût des pratiques - Enregistrement des conditions climatiques, des opérations... |

Tableau 4.5-4. Bases du référentiel technique national "Production intégrée de raisin" ITV-ONIVINS.

Facteurs limitants

Si la prise de conscience des viticulteurs pour faire évoluer leurs pratiques en direction d'une meilleure prise en compte des problèmes environnementaux est indéniable, on doit constater que la fraction de producteurs pouvant se prévaloir de mettre en œuvre l'IPM demeure faible bien qu'aucune enquête statistique ne permette d'avancer de chiffre. Selon les experts de l'ITV, il se situerait en de ça de 5 %. Cette situation traduit de réelles difficultés d'ordres divers comme le déficit de formation, d'information, d'outils ou d'équipements mais aussi de connaissances.

L'objectif IPM est en fait particulièrement complexe car au-delà du bon usage des pesticides (choix des produits, conditions de pulvérisation gestion des déchets), du respect de seuils d'interventions contre les ravageurs et de la mise en œuvre de techniques culturales préventives qui relèvent d'un capital savoir, on doit souligner un sérieux déficit de connaissances épidémiologiques sur les maladies permettant d'évaluer les risques de dommages et donc de décider ou justifier les interventions phytosanitaires. Cette situation est un frein très sérieux à la limitation du nombre de traitements. Enfin il convient d'observer que les pratiques relevant du référentiel Production Intégrée n'ont pas été évaluées sur la base de leur capacité à maîtriser les processus parasitaires polyétiques.

Viticulture biologique

La viticulture biologique est définie au plan européen, comme les autres formes d'agriculture biologique par le règlement CEE N° 2092/91. Elle se caractérise entre autres par un mode de production basé sur la gestion de l'activité microbienne des sols et le recyclage des déchets organique (Coulon et Sentenac, 2001). En fait, elle se distingue fondamentalement de la viticulture raisonnée par le choix des produits phytosanitaires utilisés (exclusivement minéraux ou naturels) et par l'obligation de travail du sol alors que le désherbage chimique appliqué en plein ou limité aux rangs de plantation constitue une option de la viticulture classique ou intégrée. Comme en IPM, la viticulture biologique fait face aux attaques de ravageurs grâce à la confusion sexuelle, au *B.thuringiensis* et à la régulation naturelle des populations d'insectes ou d'acariens par les auxiliaires. Pour contrôler *S.titanus* vecteur de la FD, elle se heurte aussi à la nécessité de faire appel à des molécules qui, bien que naturelles et peu rémanentes comme la roténone, n'en sont pas moins toxiques à l'égard des auxiliaires (Rousseau, 2000).

La viticulture biologique ne propose pas non plus à proprement parler de méthodes alternatives originales contre les bio-agresseurs majeurs susceptibles de limiter les intrants fongicides. Elle est en effet étroitement dépendante de traitements au cuivre (anti-mildiou) et au soufre (anti-oïdium) qui sont généralement nombreux car à mode d'action préventif. L'application répétée du cuivre depuis plus d'un siècle dans certaines parcelles a conduit à des situations d'accumulation dans les sols pouvant s'avérer phytotoxiques à l'égard des jeunes plantations (Delas, 1980), des perturbations de la microflore et de la faune lombricienne (Chaussot, 2003). Les risques d'intoxication des micro-organismes aquatiques sont notables en cas de dérive des pulvérisations. L'impact de ces traitements peut toutefois conduire à des effets sub-phytotoxiques contribuant à réduire la vigueur des plantes et corrélativement l'impact de certains parasites comme *B.cinerea*, l'agent de la pourriture grise. Par ailleurs, les résidus de cuivre dans les moûts peuvent induire des altérations de la typicité aromatique des vins en interagissant avec les groupements thiols des molécules précurseurs d'arômes (Darriet *et al*, 2001)

En résumé, les pratiques culturales mises en œuvre en viticulture biologique ne sont pas réellement spécifiques et ne sont pas de nature à apporter une alternative à la protection chimique, aussi les perspectives de restrictions réglementaires susceptibles de concerner le cuivre dans le cadre de la réhomologation européenne (directive 91/414) à l'horizon 2006 n'excluent pas la possibilité d'une impasse technique si les doses hectares autorisées devaient être inférieures au seuil actuel de 6 kg / an (valeur dérogatoire). Les vignobles exposés à des conditions climatiques sèches, moins exposés aux risques de mildiou, seraient évidemment moins concernés. Ce scénario est d'autant plus à craindre qu'aucune étude publiée ne permet de valider l'intérêt de certaines préparations à base de plantes (purin d'orties par ex) autorisées dans le cahier des charges de l'agriculture biologique.

4.5.4. Bilan intermédiaire pour la vigne

La production viticole apparaît aujourd'hui extrêmement dépendante de l'utilisation des pesticides d'un point de vue micro-économique mais aussi structurel en raison des règles qui l'encadrent. Elle est confrontée à une gamme diversifiée de bio-agresseurs présentant des profils épidémiologiques et un potentiel de nuisance variables face auxquels les perspectives de mise en œuvre de méthodes alternatives s'avèrent limitées. Une distinction doit être faite cependant entre les agents pathogènes et les ravageurs animaux. Contre les premiers, les propositions sont surtout restreintes à la maîtrise de la vigueur des plantes. Contre les seconds, insectes et acariens, les procédés de lutte biologiques, biotechniques ou le respect de la faune auxiliaire peuvent dans une majorité de situations assurer une bonne prévention des dommages. Le recours aux insecticides demeurera cependant conditionné localement par la nécessité de limiter la progression de la flavescence dorée.

La mise en œuvre de la protection intégrée par une fraction croissante de producteurs constitue un objectif devant conduire à deux types de résultats : une réduction du nombre de traitements et une amélioration des pratiques de gestion et d'application de produits phytosanitaires. Il devrait en résulter des avantages environnementaux mais le lien reste à établir, sur la base d'indicateurs pertinents, entre pratiques et impacts. Par ailleurs, le gain financier ne peut être tenu pour négligeable par une économie viticole en crise face à la concurrence mondiale.

Les expériences pilotes ou de démonstrations conduites en régions conduisent à situer l'économie potentielle de pesticides en viticulture dans une fourchette de 30-50%. Cependant, le pourcentage d'adeptes de la protection raisonnée ou intégrée demeure faible, ce qui traduit l'existence de sérieux facteurs de blocages qui devront être analysés pour conduire à des propositions d'actions. Ces facteurs sont de natures diverses mais concourent majoritairement au fait que la capacité de décision ou d'arbitrage du viticulteur face à sa perception des bénéfices et des coûts attendus d'une intervention est très insuffisante. Parmi les pistes qui nous semblent devoir être privilégiées pour faciliter les évolutions nécessaires certaines relèvent de l'apport de connaissances disciplinaires, notamment dans le domaine de l'épidémiologie et de l'agronomie : modélisation, fonctions de pertes, outils de prévision, élaboration de scénarios s'appuyant sur des leviers d'action technique optimisant les impacts agronomiques sur la qualité environnementale, celle du raisin et le rendement. D'autres relèvent d'approches pluridisciplinaires et de la problématique du développement durable (à traiter hors de ce chapitre) : comment remonter le niveau d'exigences en matière d'impacts environnementaux (par de moyens réglementaires, incitatifs, privés ou collectifs par ex.) de manière compatible avec les intérêts économiques des différentes parties prenantes ? La réponse à cette question conduit à l'obligation de développer des méthodologies adaptées, la modélisation notamment, pour structurer l'interface entre disciplines et fournir des supports d'aide à la décision.

4.6. L'arboriculture fruitière

4.6.1. Principaux bio-agresseurs en arboriculture fruitière

S'agissant de cultures pérennes, on peut comme pour la vigne distinguer les bio-agresseurs à l'origine de pertes de récolte et ceux qui affectent le patrimoine de production. Dans le cas des arbres fruitiers, ces catégories sont assez largement liées au type d'organe atteint. On les représentera par : T parasites telluriques, B du bois, V des organes verts, F des fleurs ou fruits, sachant qu'il existe des recouvrements entre catégories

Virus et phytoplasmes

V- Sharka (plum pox virus) sur arbres fruitiers à noyaux Lutte obligatoire
V- Enroulement chlorotique de l'abricotier (ECA) Lutte obligatoire

Bactéries

B- Galle du collet (*Agrobacterium tumefaciens*)
V- Feu bactérien (*Erwinia amylovora*) sur fruits à pépins Lutte obligatoire
V- Taches bactériennes (*Xanthomonas arboricola*) Lutte obligatoire
V- Dépérissements bactériens (*Pseudomonas syringae*), arbres fruitiers à noyaux

Maladies fongiques

T- Pourridiés (*Armillaria mellea*) sur les différentes espèces fruitières
V- Cloque du pêcher (*Taphrina deformans*), en pêcher et amandier,
V- Oïdium du pommier et du poirier (*Podosphaera leucotricha*)
V&F- Tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*), Tavelure du poirier (*Venturia pirina*)
F- Monilioses (*Monilia fructigena*), arbres fruitiers à pépins et à noyaux ;
F- *M. laxa* et *Monilinia fructicola* sur arbres fruitiers à noyaux

Acariens

V- Acarien rouge *Panonychus ulmi* sur différentes cultures fruitières
V- Acarien jaune *Tetranychus urticae*, surtout pêcher et abricotier

Insectes (principales espèces)

Pucerons

V- Puceron lanigère *Eriosoma lanigerum*
V- Puceron vert du pommier *Aphis pomi*
V- Puceron noir du cerisier *Myzus cerasi*
V&F- Puceron cendré du pommier *Dysaphis plantaginea*,
V&F- Puceron mauve du poirier *Dysaphis piri*
V&F-Puceron vert du pêcher *Myzus persicae*

Psylles

V- Psylle commun du poirier *Cacopsylla piri*

Cochenilles

B&F- Pou de San Jose *Diaspidiotus perniciosi*, sur espèces fruitières, Lutte obligatoire
B- Cochenille blanche du mûrier *Pseudolacaspis pentagona* sur pêcher, abricotier, amandier

Coléoptères

B : divers scolytes et capnodes ; V divers charançons dont les péricètes ; F : anthonomes

Lépidoptères

F : Carpacse des pommes *Cydia pomonella* sur arbres fruitiers à pépins et noyer, très occasionnellement en France abricotiers et pêchers
F : Tordeuse orientale *Cydia molesta* sur pêcher, secondairement pommiers et poiriers
F : Carpacse des prunes *Cydia funebrana* sur prunier
F : tordeuses de la pelure (plusieurs espèces de Tortricidae)
V : mineuses des feuilles, principalement *Phyllonoricter blancardella* sur pommiers et poiriers
B : Zeuzère *Zeuzera pirina* sur pommiers poiriers, cossus, et sésies sur différentes espèces

4.6.2. Pratiques actuelles

Les dommages essentiels en arboriculture fruitière sont causés par les bio-agresseurs se développant sur fleurs ou sur fruits. Toutes les espèces listées ci-dessus dans la catégorie F font l'objet de mesures de lutte chaque année dans une majorité de vergers conventionnels, à l'exception des tordeuses de la pelure et du pou de San-José dont la présence n'est pas régulière.

La lutte contre cette dernière espèce, très polyphage, est obligatoire lorsqu'elle est présente (lutte chimique).

Plusieurs maladies font l'objet d'une lutte collective obligatoire. Des prospections supervisées par le SPV sont organisées dans les bassins de production touchés, et les arbres infestés sont arrachés (voire les vergers dans le cas de forte contamination sharka). L'efficacité de la lutte contre les vecteurs (divers pucerons pour la sharka, psylle du prunier pour *Xanthomonas*) est très faible.

Hors ces maladies, peu de bio-agresseurs ne s'attaquant pas aux fruits sont régulièrement l'objet de mesures de protection. C'est néanmoins le cas pour la cloque du pêcher, compromettant la croissance des arbres et la fructification, et pour la zeuzère qui peut tuer des jeunes pommiers et poiriers en l'absence de lutte. Elle fait annuellement l'objet de 1 à 4 traitements (pyréthrinoïdes) dans les bassins Rhône-Méditerranée et sud-ouest (Coupard et Reynier 2005).

Sont aussi régulièrement traités le psylle sur poirier et les acariens (*P. ulmi* essentiellement), mais avec pour ces deux espèces des seuils d'intervention qui ne sont pas toujours atteints du fait d'une possibilité de régulation naturelle (Pekar 1999, Lyoussoufi *et al* 1994, Sauphanor *et al* 1993).

Comme pour la majorité des systèmes de culture, la protection des vergers se fait essentiellement par voie chimique. D'une importance limitée en termes de surfaces occupées (1% de la SAU) et de poids économique (4% de la valeur de la production agricole totale), l'arboriculture fruitière est caractéristique pour l'intensité de sa protection phytosanitaire. En 1998, elle représentait en valeur 4% du marché national des fongicides et 21% du marché des insecticides. Le verger de pommiers est le plus étendu (54 000 ha, sur 170 000 ha de verger national), c'est aussi le plus traité (Codron *et al.*, 2003). Il recevait en moyenne en 1997 : 17,6 traitements fongicides et 10,5 traitements insecticides / acaricides. Le verger de poiriers recevait quant à lui, 10 fongicides et 10,9 insecticides / acaricides, et le verger de pêcheurs, 7,5 fongicides et 6,6 insecticides / acaricides (Agreste 1998).

Il s'agit de moyennes des valeurs des différentes régions productrices, non pondérées selon la surface du verger régional. A titre d'exemple, le nombre d'applications fongicides en pommiers atteint 24,3 en Limousin et 26 en Midi-Pyrénées. Le nombre de traitements contre le seul carpocapse des pommes est de 9 à 13 selon la précocité de la variété en région PACA (Coupard et Reynier 2005), quand 40% du verger de pommiers national est implanté dans le sud-est. Malgré cela les intrants pesticides en pommier totalisent moins de 1 000 Euros par an sur un total de charges opérationnelles de l'exploitation dépassant 15 000 Euro (Codron *et al* 2003), et une limitation de 0,1% du taux de fruits infestés couvre le prix moyen d'un traitement.

Les mesures de protection des vergers sont définies par des ouvrages de référence déclinés par espèce fruitière et édités par les instituts techniques (ACTA, CTIFL) sous forme de guides pratiques de défense des cultures et de brochures (Giraud *et al* 1996). Ces guides qui font l'objet d'actualisations régulières décrivent la biologie des principaux bio-agresseurs, les méthodes de surveillance, les seuils d'intervention, les méthodes de lutte disponibles. Rédigés en collaboration avec les organismes de recherche et le SPV, ils intègrent les connaissances validées dans le cadre de réseaux d'observation. L'évolution des pratiques suit celle des populations de bio-agresseurs, de la législation des pesticides, des innovations (surtout par l'adoption de méthodes alternatives), et des cahiers des charges en relation avec les stratégies des organisations de producteurs (OP). Ces OP reçoivent pour une majorité d'entre elles l'agrément des sections nationales (pomme, poire, pêche) et sont donc conformes aux chartes Production Fruitière Intégrée (Tronel *et al* 2002). L'analyse des pratiques indique qu'aujourd'hui encore elles sont basées pour l'essentiel sur le raisonnement de la protection chimique :

. choix des produits les moins toxiques pour l'utilisateur, et les moins dommageables à la faune auxiliaire. Cette condition est posée en premier lieu par les entomologistes californiens qui découvrent dès 1952 dans les vergers des pullulations d'acariens, nouveaux agresseurs générés par les traitements

au DDT contre le carpocapse. Les informations sur la toxicité sur auxiliaires des pesticides, issues de publications scientifiques, de bases de données, des résultats de groupes de travail comme Pesticides and Beneficials de l'OILB SROP (Sterk *et al* 1999) et d'essais en vergers en conditions de pratiques agricoles sont synthétisées sous une forme accessible aux praticiens dans une publication actualisée périodiquement (Reboulet et Gendrier 2000).

Ces recommandations de choix des pesticides sont bien reconnues par l'ensemble de la profession. Elles ont permis une réduction du nombre de traitements contre des organismes que favoriserait une pression chimique intense, comme les acariens sur différentes espèces fruitières et les psylles en poiriers. Dans divers pays européens, des cahiers des charges en Production Fruitière Intégrée interdisent le recours aux insecticides les plus toxiques sur auxiliaires (listes rouges, incluant principalement pyréthriinoïdes et organophosphorés). Selon les nouvelles procédures européennes, les dossiers d'homologation de substances actives doivent inclure une évaluation de toxicité sur les principaux groupes d'antagonistes des bio-agresseurs.

. **positionnement optimisé des traitements**, par connaissance et suivi de la dynamique des populations des nuisibles. Cette nécessité est prise en compte de longue date en arboriculture fruitière. L'arrivée des arsénates en 1900 avait marqué le début de la protection chimique des vergers à grande échelle. Très partiellement efficace, elle devait s'appuyer sur une connaissance précise de la biologie des insectes, pour raisonner la protection par un meilleur positionnement des traitements. A cette fin, une relation entre température et développement du carpocapse des pommes fut définie par Glenn dès 1922.

Pour les principaux ennemis du pommier que sont la tavelure et le carpocapse, une prévision des risques à partir de modèles phénologiques est aujourd'hui assurée régionalement et diffusée dans le cadre des avertissements agricoles (Service de la Protection des Végétaux). Elle permet surtout de mieux cadrer les périodes de protection mais des seuils d'intervention sont également définis pour chacun des ennemis clés des différentes cultures fruitières, basés sur des échantillonnages ou des piégeages spécifiques (guides ACTA, CTIFL). Ils permettent lorsqu'ils sont appliqués une réduction de moitié du nombre de traitements contre la tavelure et le carpocapse notamment, mais nécessitent une surveillance à la parcelle et ne font pas l'objet d'une large adoption (Toubon 1999).

. **gestion des résistances aux pesticides**. La résistance aux pesticides des bio-agresseurs des vergers est ancienne. Chez le carpocapse des pommes elle apparaît dès 1928 pour les arsénates (Hough 1928), et à partir de 1955 après seulement cinq années d'utilisation pour le DDT en Australie puis aux USA (Smith 1955). En France ces résistances concernent aujourd'hui une majorité des ravageurs clés des cultures fruitières (tavelure, acariens, différentes espèces de pucerons, psylle, mineuses des feuilles, carpocapse) et suspectées pour d'autres comme la tordeuse orientale du pêcher ou la zeuzère (Sauphanor *et al* 1998, Delorme *et al* 1999, Bues *et al* 2000, Mazzoni & Cravedi 2002). Leur occurrence est directement liée à l'intensité du recours aux pesticides, elles sont souvent peu réversibles et les mesures préventives sont donc à privilégier.

Ces mesures ont fait l'objet de peu d'attention de la part des acteurs institutionnels (recherche, protection des végétaux, instituts techniques) lors de la mise en place des stratégies de protection intégrée. La priorité était donnée alors au choix de nouvelles matières actives plus spécifiques et à meilleur profil environnemental, sans véritable communication sur la nécessité d'alternance ni de rotation de modes d'action ou de familles chimiques dans la mesure où était parallèlement recommandé l'emploi de mesures alternatives de protection. Bien souvent ces nouvelles matières actives se sont avérées plus sujettes que les molécules anciennes à des pertes d'efficacité liées à l'apparition de résistances. Exploré chez le carpocapse des pommes, ce différentiel de durabilité des molécules est attribuable au degré de dominance de la résistance, fonctionnellement récessive dans le cas des pyréthriinoïdes et organophosphorés et dominante pour les principaux groupes de régulateurs de croissance d'insectes : les hétérozygotes, les plus fréquents lors de l'apparition de la résistance au sein des populations, survivent à la dose d'application au champ (Bouvier *et al* 2002).

Les mesures de prévention (limitation du nombre annuel d'applications par famille chimique), qui s'imposent lors de l'apparition de résistances chez un groupe de bio-agresseurs, sont essentiellement portées par les services techniques des industries phytosanitaires. Elles ne sont pas toujours relayées par les services commerciaux de ces mêmes industries, qui à l'instar des arboriculteurs et de leurs

conseillers se focalisent souvent sur l'efficacité de la protection sur l'année en cours. A la résistance est associée une perte partielle ou totale de l'efficacité des traitements, se traduisant souvent par une augmentation de leur fréquence et parfois même par l'abandon du raisonnement c'est-à-dire le retour aux traitements sur calendriers (cas des principaux agresseurs du pommier : tavelure, puceron cendré, carpocapse).

4.6.3. Alternatives

Les méthodes alternatives à la protection chimique sont mises au point essentiellement pour les ravageurs clés. C'est contre eux que les traitements chimiques sont les plus nombreux en stratégie conventionnelle. Leur remplacement par des méthodes spécifiques est donc déterminant, pouvant à la fois favoriser la régulation naturelle de certains agresseurs et le développement d'autres bio-agresseurs préalablement contrôlés par les pesticides non sélectifs.

4.6.3.1. La lutte génétique

La lutte au moyen de variétés résistantes est peu développée en arboriculture fruitière. Des sources de résistances à plusieurs bio-agresseurs du pêcher dont le puceron vert, l'oïdium, la cloque et la Sharka sont identifiées et des programmes de création variétale sont entrepris (Sauge *et al* 1998, Foulongne *et al* 2003). Mais les variétés commerciales sont majoritairement issues de géniteurs sensibles, et le nombre élevé de segments de marché à couvrir (variétés de précocité échelonnée pour chacune des catégories pêches jaunes et blanches, nectarines jaune et blanche, et aujourd'hui pêches plates) laisse peu d'espoir d'un remplacement à terme des variétés sensibles. Les variétés de pommes résistantes à la tavelure permettent de restreindre le nombre de traitements fongicides, qui sont alors dirigés contre l'oïdium (Roche *et al* 2003, Combe *et al* 2005). Malgré un programme actif de création variétale elles sont peu implantées faute d'intérêt du marché pour ces variétés. Outre la segmentation du marché de la pomme, les choix variétaux lors de la plantation sont surtout orientés par l'adaptation aux conditions régionales, les performances agronomiques et les qualités technologiques. Par ailleurs persiste le risque de contournement des résistances dans les zones de production (Parisi *et al* 2005), compromettant l'investissement à long terme que représente la création d'un verger.

4.6.3.2. La lutte biologique

La lutte **par introduction** ou lâchers massifs d'entomophages ou par utilisation d'antagonistes des maladies fongiques est également peu utilisée, malgré l'antériorité dans ce domaine du modèle arboriculture fruitière. Le concept de lutte biologique naît avec l'introduction aux USA, par C.V. Riley en 1889, d'une coccinelle australienne pour réguler les invasions de la cochenille australienne des agrumes. La même année, Riley introduit en nouvelle Zélande des parasites américains du carpocapse des pommes.

Aujourd'hui encore des développements de la lutte biologique sont envisagés en arboriculture fruitière essentiellement contre les insectes et assez peu contre les maladies fongiques comme la tavelure (Carisse & Dewdney, 1982). En Allemagne, les agriculteurs biologiques ont utilisé un temps des lâchers de trichogrammes pour lutter contre le carpocapse des pommes, avec une efficacité limitée. En France, des lâchers d'*Anthocoris nemoralis* pour la lutte contre le psylle du poirier ou de la coccinelle *Harmonia axyridis* contre diverses espèces de pucerons des arbres fruitiers ont été évalués au cours de la précédente décennie. Sans réponse claire sur les conditions d'efficacité de la méthode, le coût de la production de ces auxiliaires s'est avéré trop élevé pour une utilisation pratique. Des lâchers inoculatifs d'*Aphelinus mali*, parasitoïdes du puceron lanigère *Eriosoma lanigerum*, ou du parasitoïde originaire de Chine, *Prospatella perniciosi* pour lutter contre le pou de San José *Quadrastipidiotus perniciosi* sont effectués occasionnellement (Gendrier, 1999).

On peut citer des cas ponctuels d'acclimations réussies, comme récemment dans le cas de la lutte contre *Metcalfa pruinosa*. A l'instar de la vigne, l'introduction de phytoséides (acariens prédateurs d'acariens) reste l'exemple récent le plus cité en matière de lutte biologique en arboriculture fruitière.

Les techniciens du développement en ont été les principaux acteurs en France, et ont accompagné ces introductions d'un soutien aux recommandations de l'OILB ou des instituts techniques (ACTA, CTIFL) en matière de respect des seuils d'intervention par acaricides chimiques. Ces mesures ont été d'autant plus suivies que les acaricides sont d'un coût très élevé et qu'ils voient leur efficacité altérée par l'apparition de résistances. Diverses espèces de phytoséides (acariens prédateurs d'acariens) ont dans un même temps développé des résistances aux pyréthrinoides et aux organophosphorés, et restent donc actifs dans un contexte de lutte chimique intensive contre les autres bio-agresseurs du verger.

Lutte biologique **par conservation**. On recommande en réponse à l'appauvrissement des paysages la création de zones de compensation écologique. Elles peuvent être constituées de bosquets ou de friches, voire de productions extensives sans engrais ni pesticide. Les haies composites (associant diversité spécifique et de structure) en remplacement des haies brise-vent monospécifiques sont largement expérimentées en arboriculture, voire implantées par les producteurs avant même que la démonstration soit faite de leur utilité en termes de régulation du parasitisme. Elles renforcent localement la biodiversité végétale et animale (Rieux *et al* 1999, Simon *et al* 2002, Debras *et al* 2003). Il n'y a à notre connaissance pas d'action à l'échelle du paysage pour aménager des continuités entre ces haies et assumant ainsi un rôle de corridor pour limiter les effets de la fragmentation. Des initiatives ponctuelles, en complément des strictes mesures de protection intégrée, comme la création sur les parcelles ou dans les haies d'habitats spéciaux pour des espèces en danger (nichoirs pour oiseaux, chauve-souris...), favorisent la prise de conscience par les arboriculteurs de l'intérêt des auxiliaires des cultures (Jay 200).

4.6.3.3. La lutte microbiologique

Bacillus thuringiensis n'est efficace sur aucun agresseur clé des vergers (actif sur la Cheimatobie *Operophtera brumata*, peu présente en vergers commerciaux). L'utilisation de divers micro-organismes incluant *Beauveria* et des nématodes entomopathogènes contre le carpocapse a fait l'objet de très nombreuses investigations mais d'aucune application pratique (Cross *et al* 1999), à l'exception notable du virus de la granulose du carpocapse homologué en pommiers et poiriers et recommandé sur des populations modérées du ravageur.

4.6.3.4. La lutte autocide

La lutte autocide (*Sterile Insect technology*) repose sur des lâchers de mâles stérilisés (le plus souvent par rayons γ). Cette méthode a connu des succès très significatifs dans la lutte contre certains diptères (mouches des fruits, mouches du bétail, glossines, moustiques) en particulier sur le continent américain et en Lybie. Les essais conduits en Europe n'ont pas connu d'application. La méthode, qui exige la mise en place de très grosses unités de production de mâles stériles, a également été utilisée contre des lépidoptères comme le carpocapse des pommes (en Colombie Britannique en particulier, un programme initié en 1994 permet la production de 15 millions d'insectes par semaine et limite fortement l'utilisation d'insecticides). L'AIEA a considéré cette espèce comme le meilleur modèle, parmi 19 lépidoptères, pour le développement de ce type de technologie et a lancé en 2000 un projet international (Allemagne, Autriche, Tchéquie, Canada, USA, Australie, Afrique du Sud, Chili, Brésil, pas d'équipe française faute de moyens humains). Les critères ayant conduit au choix de cette espèce sont son importance économique au niveau mondial, la possibilité d'élevages de masse, sa capacité de migration, l'intérêt manifesté par les producteurs, le petit nombre de plantes-hôtes, les outils de monitoring, l'existence d'autres méthodes de lutte non chimiques compatibles et de réseaux nationaux/internationaux. La possibilité de ré-infestation à partir de foyers non protégés constitue un facteur défavorable. L'obstacle principal à la diffusion de cette méthode reste son coût, envisageable pour des opérations d'éradication mais qu'on évalue difficilement en protection permanente contre des bio-agresseurs résidents.

4.6.3.5. La lutte biotechnique

Différentes méthodes de lutte s'appuient sur l'utilisation de phéromones sexuelles de synthèse. La confusion sexuelle basée sur la diffusion de grandes quantités de phéromone dans l'atmosphère pour prévenir le rencontre des partenaires sexuels, est la plus utilisée. En vergers plusieurs formulations sont homologuées, principalement contre les lépidoptères : plusieurs espèces de tordeuses, dont les tordeuses de la pelure, la tordeuse orientale du pêcher et le carpocapse des pommes, ainsi que des espèces xylophages comme la zeuzère (Charmillot *et al* 1987, Audemard *et al* 1997, Waldner 1997). Des développements sont en cours pour le carpocapse des prunes. Le coût élevé de la méthode, la recherche d'un risque minimum, peut-être aussi la peur de l'innovation, leur font encore préférer les insecticides conventionnels. Son adoption favoriserait la transition vers la protection intégrée car la méthode de confusion nécessite le regroupement des agriculteurs (application sur de grandes surfaces contiguës) et une surveillance attentive de l'évolution des populations sur chaque parcelle. La méthode de confusion est de ce fait souvent mise en avant dans le cadre de mesures agri-environnementales (les CTE antérieurement, et le forfait Production Fruitière Intégrée). En vergers de pêcher, la confusion sexuelle contre la tordeuse orientale *Cydia molesta* est disponible depuis 1989. Son efficacité est jugée satisfaisante mais outre son coût élevé, sa spécificité impose de traiter chimiquement avec des produits actifs contre la tordeuse orientale d'autres bio-agresseurs comme les thrips.

La méthode attracticide basée sur l'association dans une goutte de résine (appliquée à raison de 1 à 3 gouttes par arbre) d'un attractif (le plus souvent phéromone sexuelle) et d'un insecticide de contact n'a pas été autorisée en France sur carpocapse du fait de son inefficacité sur souches résistantes et d'un risque aigu de sélection des résistances par cette méthode (Poullot *et al* 2001).

4.6.3.6. Méthodes mécaniques

Des méthodes mécaniques restent exceptionnellement employées contre certains bio-agresseurs, essentiellement en agriculture biologique : décapage à l'eau à haute pression ou brossage des troncs contre les cochenilles, destruction des larves xylophages au moyen de fils de fer, section des pousses infestées par les pucerons.

| Principaux groupe de bio-agresseurs | Importance actuelle des bio-agresseurs | Efficacité actuelle des méthodes de lutte généralement mises en œuvre | | | | |
|-------------------------------------|--|---|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|
| | | Lutte chimique | Résistance variétale | Lutte biologique | Méthodes de lutte physique | Système de culture |
| Champignons (sensu lato) | +++ | ++ | + | - | - | ++ |
| Bactéries | ++ | - | - | - | + | ++ |
| Virus, viroïdes et mycoplasmes | +++ | + | + | + | - | ++ |
| Acarie | + | ++ | - | + | - | - |
| Insectes | +++ | ++ | - | + | - | - |
| Nématodes | + | - | - | - | - | + |
| Adventices | + | +++ | - | - | - | +++ |
| Autres* | | | | | | |

Tableau 4.6-1. Arboriculture fruitière (dans son ensemble, incluant les fruits à noyaux)

Des mesures indirectes peuvent réduire le potentiel de développement des épidémies : réduction de l'inoculum par mosaïques de variétés dotées de différentes résistances, par exportation des organes infestés en saison associée à l'éclaircissage manuel (Boivin et Sauphanor 2005), après récolte par destruction des fonds de cueille ou enfouissement des feuilles (Gometz *et al* 2004) ou pendant la taille d'hiver, par des modes de conduite de l'arbre n'induisant pas une forte pousse favorable à certains

phyllophages. Ces principes, en développement dans le cadre d'actions Production Intégrée, sont encore insuffisamment validés, et le raisonnement de la protection reste compartimenté par cible et par mode de régulation.

4.6.4. Exemple du verger de pommiers

L'analyse des pratiques indique que seuls la tavelure et le carpocapse des pommes font l'objet de mesures de protection directe dans les vergers de pommiers sous cahier des charges agriculture biologique, traduisant l'impact sur la culture de ces deux bio-agresseurs (Bouvier *et al* 2005).

La tavelure est la principale maladie cryptogamique de l'espèce fruitière, à l'origine de plus de la moitié des interventions phytosanitaires dans les différents bassins de production, et avec une prépondérance plus marquée dans les régions septentrionales.

La protection est raisonnée sur la base des périodes de contamination primaires, initialement avec des traitements préventifs. Ils s'effectuent à partir des stades phénologiques C-C3 du pommier en l'absence d'indicateur de risque, ou selon les avertissements agricoles qui indiquent les périodes de risque de contamination selon la réceptivité du végétal, l'observation de la maturité des ascospores, les taux et durée d'humectation et la température (Dionnet 1982, Olivier *et al* 1983, Olivier 1986). Lors de cette période de risque, si les contrôles visuels révèlent la présence de taches de tavelure sur les feuilles ou les fruits, des traitements de rattrapage de type éradiquant sont appliqués. Une protection contre les contaminations secondaires est nécessaire si la tavelure est présente sur la parcelle malgré la protection en première période. Bien que ce raisonnement reste valable en théorie, il n'est plus vraiment applicable du fait de la résistance de la tavelure aux fongicides devant être utilisés en traitement curatif (IBS) et donc de la généralisation des stratégies uniquement préventives avec des produits de contact (note nationale tavelure INRA-CTIFL-SDQPV 2004). Des cas de résistance aux familles utilisables en préventif (anilino-pyrimidines, strobilurines) sont par ailleurs observées depuis 2003 dans le sud de la France. En conséquence la traduction pratique des stratégies dans les préconisations des groupements de producteurs est aujourd'hui de "diminuer la durée d'action des spécialités aussi bien préventives que curatives (efficacité insuffisante en fin de rémanence du produit)" (SPV *et al* 2005). Pour l'ensemble des fongicides autorisés contre la tavelure, l'utilisation est aujourd'hui raisonnée en fonction du risque d'apparition de résistance. Au delà de l'optimisation d'une méthode de lutte, chimique en l'occurrence une réflexion est conduite sur la combinaison d'effets partiels. C'est le cas pour les mesures prophylactiques telles l'enfouissement des feuilles à l'automne ou de modes de conduite de l'arbre favorisant l'aération et la pénétration de la lumière dans la couronne (Simon *et al* 2005). Une vingtaine de facteurs à différents niveaux (le champignon, l'arbre, le verger, le système commercial) sont identifiés comme pouvant contribuer à réduire le problème tavelure et l'utilisation de fongicides de synthèse (note nationale tavelure INRA-CTIFL-SDQPV 2004, Parisi *et al* 2004, VanLoqueren et Baret 2004). Les facteurs agronomiques les plus cités sont la zone de plantation, le choix variétal (les variétés comme Gala et Pink lady sont très sensibles, des variétés peu sensibles sont identifiées), la taille du bloc variétal, la vigueur du porte greffe, la densité de plantation et la conduite, la fumure azotée, les filets para-grêle.

Le puceron cendré est traité préventivement avec deux traitements systématiques en pré-floral, et des traitements curatifs post-floraux complémentaires sont recommandés seulement à partir de l'observation des premières feuilles crispées par le puceron. Du fait du retrait récent du vamidithion et de la suppression en 2004 de l'AMM pour l'imidaclopride, les produits encore utilisables sont jugés insuffisamment efficaces du fait des résistances et les recommandations s'orientent vers un remplacement des traitements curatifs par deux traitements préventifs supplémentaires en post-floral (SPV *et al* 2005).

Une situation similaire se dessine pour **l'acarien rouge**. Les traitements préventifs à la chute des pétales se sont généralisés à la fin des années 1990 avec la résistance de *P. ulmi* aux ITEM, n'offrant plus aucune garantie d'efficacité pour les traitements effectués en été. Dans les vergers de référence du sud-est, le taux de parcelles traitées préventivement au printemps avec de l'etoxazole devant être à

nouveau traitées en été est de 70%, ce taux chute à 21% pour les parcelles traitées préventivement avec de l'agriméc (SPV *et al* 2005). Ces traitements curatifs sont recommandés quand le taux de feuilles occupées atteint 50% en l'absence de prédateurs, ou 80% avec présence significative de prédateurs phytoséides. En moyenne 2 acaricides spécifiques sont appliqués chaque année en pommiers protégés chimiquement contre le carpocapse, le nombre se réduit lorsqu'est employée la confusion sexuelle contre le carpocapse (Sauphanor *et al* 2005). La conduite de l'arbre, la fertilisation et l'irrigation influent sur ces formes de parasitismes, et la conduite centrifuge permettant une meilleure aération de la couronne et réduisant la pousse des rameaux limite le développement du puceron cendré et de l'acarien rouge (Simon *et al* 2005).

Contre le **carpocapse** le nombre d'application annuelle de pesticides s'est accru depuis 15 ans d'un facteur 1,5 à 3 selon la région, du fait de la résistance aux insecticides et de l'accroissement de la période de risque. En effet les conditions climatiques autorisaient 2 générations strictes dans les années 70, et une 3ème génération presque complète se développe actuellement. Les causes en sont une augmentation de température (+ 400 degrés jours en base 10 entre 1970 et 2000), une modification de la réponse de l'insecte à la photopériode entraînant une diapause retardée de près de 15 jours pendant cette même période, et l'implantation de variétés tardives à très tardives (Granny Smith et surtout Pink Lady), bien valorisées commercialement mais fournissant une ressource alimentaire à l'insecte jusqu'à fin octobre. Le déclenchement des traitements selon des seuils de capture aux pièges sexuels est aujourd'hui abandonné dans une majorité de régions, du fait essentiellement de la perte d'efficacité des traitements faisant opter pour une couverture de l'ensemble de la période de risque (SPV *et al* 2005). Des alternatives existent, comme le virus de la granulose. La formulation commercialisée en France (Carpovirusine, produite par la société Calliope sous licence INRA), a été appliquée en France en 2004 sur 30 000 ha développés (surface x nombre de traitements) en pommiers-poiriers. Jusqu'en 2000, année d'homologation en France de la confusion sexuelle contre le carpocapse des pommes, le virus de la granulose était le seul moyen de lutte contre le carpocapse en agriculture biologique (AB). Elle reste encore très majoritaire en AB du fait des conditions restrictives d'utilisation de la confusion sexuelle. La problématique est la même que pour la gestion de la durabilité des insecticides chimiques, aucune communication n'est faite sur le risque d'apparition de la résistance au virus de la granulose. Conséquence logique et bien qu'aucune publication n'en fasse encore état, il semble d'après les observations sur le terrain et des essais de laboratoire par des équipes d'Allemagne, France, Suisse et Italie, que le carpocapse soit en cours d'acquisition d'une résistance à cet insecticide. Ce risque d'érosion des rares méthodes alternatives de protection en raison d'une utilisation exclusive sous certains cahiers des charges est à prendre en compte au plan général.

En France en 2004, 4 ans après l'homologation de la confusion sexuelle contre le carpocapse des pommes, 12 000 ha de pommiers et poiriers sont protégés par cette méthode au moyen des diffuseurs Shin-Etsu. En Italie, plus de 20% des 70 000 ha de pommiers sont en confusion sexuelle contre le carpocapse (en 2001, 60% des 17 500 ha de pommiers du Haut-Adige). Cette méthode y est pourtant économiquement peu concurrentielle par rapport à la lutte chimique, qui nécessite 2 à 3 fois moins de traitements qu'en France du fait de conditions climatiques plus favorables. L'avenir de cette méthode en France reste incertain. Son efficacité requiert des populations initiales faibles, difficile à obtenir avec les moyens de protection actuelle. Des traitements chimique complémentaires sont entrepris sur les pics d'éclosion pour réduire les populations. Entre 2001 et 2004, ce nombre de traitement contre le carpocapse dans les parcelles en confusion s'est accru de 1,3 à 5,2 (Coupard et Reynier 2005). Sur certaines parcelles, la lutte spécifique contre le carpocapse s'accompagne de l'installation d'autres bio-agresseurs comme la pyrale des fruits ou la tordeuse orientale du pêcher (Sauphanor *et al* 2005). D'après Williamson (1996), le bilan économique dressé sur la base des pertes et des traitements contre les différents phytophages du pommier (mineuses et tordeuses de la pelure à traiter spécifiquement, moindre développement des acariens) est en faveur de la confusion sexuelle dès lors que les populations de carpocapse sont suffisamment faibles pour être maîtrisées par cette méthode de lutte.

Diverses études indiquent enfin des interactions entre les différents actes techniques en vergers incluant les traitements, comme la prise en compte de la nécessité de traiter dans le raisonnement de l'irrigation (inondation des parcelles interdisant l'entrée des engins de traitement ou aspersion sous frondaison

lessivant les traitements) ou la dispersion /multicité variétale des parcelles d'une même exploitation interdisant souvent le raisonnement de la lutte à la parcelle (Bellon *et al* 2001).

4.6.5. Bilan intermédiaire pour l'arboriculture fruitière

L'arboriculture est une activité intensive, et économiquement risquée en l'absence de garantie sur le prix de vente. Outre le coût des pertes parasitaires directes, l'impact sur le prix de la qualité (principalement calibre et absence de défaut visuel) fait qu'une mauvaise maîtrise de la protection phytosanitaire ou l'apparition de bio-agresseurs résistants sont lourdes de conséquences sur le revenu. Des solutions ou itinéraires techniques existent pour limiter d'emploi des pesticides, mis au point par des chercheurs en particulier regroupés au sein de l'OILB ou par les producteurs de façon plus ou moins organisée.

Mais si les charges de main d'œuvre représentent près de 50% des coûts de production, la protection phytosanitaire atteint à peine 6% de ces coûts. De ce fait, si les cahiers des charges des producteurs se réfèrent aujourd'hui quasiment tous aux principes de l'OILB (Boller *et al* 1999), ils s'en écartent souvent dans la réalité (Toubon *et al* 2000, Bellon *et al* 2004). Un changement des pratiques phytosanitaire par recours accru à des méthodes lutte alternatives de protection apparaît certes pour certains arboriculteurs comme une prévention du risque à long terme (ex : confusion sexuelle prévenant l'apparition de résistances aux traitements). Mais ces méthodes supposent une bonne maîtrise technique et une prise de risque importante (ex. difficile positionnement des traitements chimiques d'appui, pas de "rattrapage" possible en cas de défaut de protection). De façon positive, on observe que le coût global induit par l'adoption de la protection intégrée n'est pas forcément prohibitif. Lié à la surveillance des parcelles, il varie entre 80 et 450 Euros selon le nombre de traitements économisés en retour : pour un verger moyen, il correspondrait à un surcoût de quelques centimes par kilogramme de fruits produits (couvert pour nombres d'OP par un "forfait PFI" mis en œuvre dans le cadre du Programme Opérationnel). Ces conclusions convergent avec celles de Willamson (1996).

4.6.5.1. Situation en Europe

Les premiers efforts de production intégrée en entreprise remontent à la fin des années 70 mais de façon relativement isolée (groupe suisse Galti en accord avec la chaîne Migros, groupe français Covapi avec Casino et Monoprix). Ces associations créent en 1982, un Comité International de Valorisation de la Protection Intégrée. Leurs propositions recueillent peu d'adhésion, les expériences ne sont pas renouvelées et le Comité est dissous. Une mission interdisciplinaire en Italie éclaire les différentes démarches d'adoption de la PFI en France et en Italie (Bellon *et al* 2000).

En 1985, la production intégrée démarre de façon explosive et à grande échelle en Italie du Nord. D'abord dans le Trentin (Sud Tyrol et Haut Adige) qui bénéficie d'une situation naturelle avantageuse pour la pomme et concentre 60% de la production italienne, puis en Emilie Romagne à partir de 1989 (pêche, poire, pomme), où sont introduits là aussi des cahiers des charges sur la base des principes de l'OILB. Avec en cas de problème technique entraînant le non-respect d'une partie des règles, une exclusion de la production concernée du cahier des charges. Les initiatives de valorisation commerciale de la production intégrée y connaissent davantage de succès que celles lancées en France à la fin des années 70. Deux raisons apparentes à cette diffusion : la sensibilité des consommateurs aux problèmes écologiques et une action collective de grande ampleur, efficacement coordonnée par les pouvoirs publics et bien relayée par de puissantes organisations commerciales italiennes. Sur le plan technique, la coordination est facilitée par l'existence de petites ou très petites structures d'exploitation (cas du Trentin où la taille moyenne est de 1 ha) et par la force de la coopération aussi bien dans la plaine du Pô que dans la région du Trentin. Les structures sont d'autant plus incitées à jouer coopératif (et donc à appliquer les règles de la PFI) que l'ensemble de la région s'inscrit dans cette démarche et que les possibilités de diversifier sur de petites surfaces sont réduites : peu de ceinture urbaine et donc peu de possibilités de valoriser par des circuits courts, peu de sources de revenu non agricoles (les

grandes villes sont loin, le tourisme existe mais sans excès), choix des spéculations agricoles réduit aux productions intensives, les seules à même de rentabiliser de si petites surfaces.

4.6.5.2. Etat actuel en France

En France, le mouvement est moins massif et plus diffus géographiquement, en raison notamment de l'éclatement régional de la production. Les options phytosanitaires de quelques cahiers des charges en France (Dans le Val de Loire et les Alpes en particulier) sont proches des directives OILB. Mais ces initiatives locales restent isolées et laissent subsister une grande hétérogénéité dans les cahiers des charges. Certains donnent la priorité à la communication, s'écartant souvent au plan phytosanitaire des principes OILB : des règles strictes (interdiction de certains pesticides, introduction d'auxiliaires, surfaces de compensations écologiques) sont simplement recommandées voire non évoquées (Toubon *et al* 2000). La réponse majoritaire à une forte pression parasitaire (maladies dans les régions septentrionales, insectes dans les régions méridionales) est de fait l'accroissement du nombre de traitements et le recours à des molécules anciennes plus actives mais plus toxiques en cas de résistance, tout en restant conforme aux bonnes pratiques agricoles et aux chartes nationales PFI constituant la démarche majoritaire en France (Tronel *et al* 2002). La règle imposée par le cahier des charges est alors le respect de la législation, considérée comme garante de la santé du consommateur voire de la préservation de l'environnement, les mesures allant au-delà de cette réglementation étant le fait de démarches volontaires. En termes de pratiques 12% des arboriculteurs français déclaraient en 1997 avoir recours à la protection intégrée, 43% à des traitements systématiques sur calendriers pré-établis (Agreste 1998). Le bilan actuel en termes de consommation d'intrants pesticides en est la résultante, de même que les faibles scores de la France dans les statistiques PFI/OILB (Sansavini 1997) ou dans les plans coordonnés européens de surveillance des résidus. La controverse demeure en France entre l'intérêt environnemental d'un progrès encadré et accessible pour le plus grand nombre et l'option type OILB, plus favorable à l'environnement mais plus contraignante et accessible à un nombre plus restreint d'arboriculteurs en l'absence d'incitation.

4.7. Bilans et perspectives pour la recherche en protection des cultures

4.7.1. Quelques éléments clés

Nous rassemblons ci-dessous quelques éléments saillants, sous forme de points. Ces points nous paraissent constituer l'ossature d'une réflexion sur la protection des cultures en France.

- 0) La notion de perte de récolte (dommage), faisant référence aux pertes directes et indirectes en quantité comme en qualité, occasionnées par les bio-agresseurs des cultures est rappelée; les pertes de récoltes causées par les bio-agresseurs incluent, mais ne se limitent pas à, des pertes de rendement.
- 1) L'objectif de la protection des cultures n'est pas de limiter la taille des populations de bio-agresseurs mais de réduire les pertes de récoltes (quantitatives et qualitatives) qu'ils peuvent occasionner.
- 2) Il y a deux manières de considérer une épidémie (au sens large du terme) dans un peuplement végétal : (1) comme une conséquence d'une perturbation de son environnement, ou (2) comme un phénomène (un processus) récurrent, influencé par le milieu et les pratiques agricoles, susceptible dans certains cas de provoquer des pertes de récoltes. Ces deux paradigmes sont également valides, et également utiles, pour la protection des cultures.
- 3) La transition entre dégâts (symptômes) et dommage (perte de récolte) dépend, d'une part, de la physiologie du peuplement (dont l'élaboration du rendement), et d'autre part, d'une fonction de dommage (la relation entre une gamme de dégâts possibles et les dommages que ces dégâts causent dans un contexte donné). Par ailleurs, la relation entre dommage et perte (économique) dépend d'une part de facteurs socio-économiques et d'autre part d'une fonction de perte (la relation entre une gamme de dommages et les pertes économiques que ces dommages causent dans un contexte donné).
- 4) L'enchaînement dégât-dommage-perte n'est ni linéaire, ni automatique. Un dégât, dans beaucoup de contextes, ne se traduit ni par un dommage, ni (a fortiori) par une perte. Dans quelques cas, cependant, un dégât minime se traduira par une perte massive. Les traductions successives de dégâts en dommage, et de dommage en perte, sont très puissamment dépendantes des contextes (techniques, biologiques, pédo-climatiques, sociaux, économiques, culturels) où l'agriculture est menée, c'est-à-dire, des situations de production.
- 5) Ce chapitre analyse la situation actuelle de la protection des plantes, le rôle que la protection chimique y joue, les possibilités d'évolution vers d'autres manières de produire et de protéger, dans quatre exemples : les grandes cultures (blé, maïs, colza, tournesol), la vigne, les cultures maraîchères et les cultures fruitières pérennes (avec un accent spécifique sur le pommier).
- 6) La mesure des dégâts a, en protection des plantes, 3 objectifs clairement distincts : (1) étudier la progression des dégâts en vue d'une analyse dynamique ; (2) comparer des méthodes de contrôle ; et (3) analyser la relation dégât-dommage. Ces différents objectifs requièrent en général des méthodes de caractérisation différentes qui ne doivent pas être considérées comme interchangeables.
- 7) Evaluer et mettre en oeuvre des méthodes de protection des cultures nécessiteraient une quantification des dommages (pertes de récoltes) que les dégâts prévisibles seraient susceptibles de causer en l'absence de protection ; et, naturellement, de l'efficacité des méthodes de contrôle pour limiter les dégâts. On peut, dans le cas de l'agriculture française, souvent s'interroger sur ces deux points, et en particulier sur le premier.
- 8) En d'autres termes : les données concernant (i) les pertes de récoltes que causent actuellement les bio-agresseurs des plantes, et (ii) les pertes qu'ils pourraient causer si les méthodes actuelles de protection n'étaient pas utilisées font largement défaut. Il s'ensuit une grande difficulté à évaluer l'efficacité des pratiques actuelles de protection, et plus encore, des pratiques futures.
- 9) Les dommages (pertes de récolte) dus à un profil de bio-agresseurs dépendent du rendement accessible et des dégâts de chacun des bio-agresseurs en présence et de leurs interactions.

- 10) La notion de risque, appliquée à la protection des plantes permet de dresser une typologie simple des différents bio-agresseurs selon deux critères : l'importance du dommage (limité ou élevé) et la fréquence de ce dommage (faible ou forte).
- 11) La protection des cultures s'envisage à 3 échelles temporelles : dans les décisions tactiques (en cours de végétation ; technologies disponibles ou à déployer) ; dans les décisions stratégiques court-terme (lors de la mise en place d'un peuplement ; technologies et instruments pour optimiser leur combinaison) ; dans les décisions stratégiques long-terme (choix de systèmes de culture, décisions qui concernent des scénarios agricoles à venir ; recherches orientées vers de nouveaux instruments de gestion, vers les impacts prévisibles de ces instruments dans un contexte variable, et par les priorités assignées aux programmes de recherches). De même, les stratégies de gestion doivent souvent être considérées à des échelles supra-parcellaires compte tenu de la propagation de certains bio-agresseurs. La prise en compte de ces trois échelles temporelle est nécessaire pour modifier les pratiques actuelles.
- 12) Il existe cinq grands groupes de méthodes de lutte contre les bio-agresseurs des plantes cultivées : l'amélioration variétale, la lutte biologique, la lutte physique, l'adaptation des pratiques culturales, et la lutte chimique. La dernière, tout au moins à l'aide de produits chimiques de synthèse, est la plus récente. Elle s'est avérée extrêmement efficace et fiable dans un nombre important de cas, sur de très grandes surfaces ; elle est associée cependant à un ensemble de nuisances et d'inconvénients, dont l'un des plus important est l'abandon partiel ou complet des quatre autres.
- 13) Raisonner l'emploi des pesticides, c'est-à-dire, fonder leur utilisation sur la nécessité objectivement mesurée d'en employer dans un contexte précis diverge de la pratique, encore courante, d'une utilisation routinière et systématique. Le résultat du raisonnement est une décision de type tactique, prise après la mise en place du peuplement végétal, et assujettie à d'autres décisions amont (stratégiques court et long terme). Raisonner est une première étape vers la réduction de l'usage de pesticides, soit en diminuant la fréquence d'application et/ou en diminuant les quantités épandues. Les options incluent : (1) une réduction de la fréquence des traitements, (2) une réduction des doses appliquées, (3) le choix de matières actives dont l'impact environnemental est moindre (cf. chapitre 3), et (4) le choix des périodes d'application tenant compte des risques environnementaux.
- 14) L'efficacité et la fiabilité de la lutte chimique, qui sont ses principaux atouts, constituent des freins importants pour l'adoption d'autres méthodes de gestion.
- 15) Parce qu'efficace et fiable, la lutte chimique est érigée comme référence, souvent implicite. Il peut s'ensuivre une mésestimation, et une élimination d'autres méthodes, soit parce qu'elles sont testées hors contexte (méthodes de lutte biologique, par exemple), soit parce que l'efficacité de ces autres méthodes est évaluée par rapport à un témoin protégé chimiquement, et non pas par rapport à un témoin sans protection aucune.
- 16) Le raisonnement de l'emploi de pesticides comporte une seconde dimension. La décision d'une protection chimique étant prise, le choix d'une matière active est un élément excessivement important, pour (1) assurer l'efficacité de la protection chimique, (2) ne pas favoriser la sélection de populations de bio-agresseurs résistants (adaptés) au pesticides, et de ce fait (3) prolonger la durée d'efficacité des matières actives le plus longtemps possible.
- 17) D'une manière générale, ce chapitre distingue, d'une part, l'efficacité intrinsèque des méthodes de contrôle, et l'efficacité de ces méthodes dans le cadre de leur mise en oeuvre: certaines résistances végétales complètes, de même que beaucoup de pesticides, ont une grande efficacité intrinsèque. Mais, déployés systématiquement, sur de grandes échelles, pendant des durées prolongées, ces outils s'avèrent souvent fragiles à cause des fortes pressions de sélection qu'ils exercent sur les populations visées.
- 18) Au contraire, les mêmes outils, déployés parcimonieusement et à bon escient, s'avèrent des outils fiables pour des durées prolongées.
- 19) Dans la même perspective, ce chapitre souligne (i) l'intérêt des résistances partielles, par opposition aux résistances végétales complètes aux bio-agresseurs, (ii) l'intérêt de diversifier, dans le temps et dans l'espace, les gènes de résistance utilisés et (iii) l'intérêt, lorsque de meilleures alternatives n'existent pas, de ne pas recourir systématiquement aux mêmes matières actives de pesticides.

- 20) Dans ce même cadre, les pratiques qui concourent, même indirectement, et partiellement, à réduire les tailles de populations de bio-agresseurs sont importantes à prendre en compte : réduisant les tailles de populations, elles limitent les effets de certaines forces évolutives (migration, recombinaison, mutation). Ce faisant, ces pratiques permettent de prolonger l'efficacité d'autres méthodes de contrôle, vis-à-vis desquelles la souplesse génétique des bio-agresseurs et leurs capacité de contournement peuvent s'exprimer.
- 21) C'est pour les grandes cultures que la marge de manœuvre pour une gestion des bio-agresseurs moins dépendante des pesticides paraît, dans l'immédiat, la plus grande;
- 22) C'est pour la vigne et les cultures maraîchères que cette marge de manœuvre immédiate paraît la plus restreinte, alors qu'il s'agit de productions végétales (1) où la protection des cultures paraît spécialement difficile et aléatoire, (2) qui correspondent à des valeurs de produits agricoles les plus élevées, et (3) qui sont, à des égards différents, plus proches du public.
- 23) Dans le cas des grandes cultures, et pour les systèmes à base de blé en particulier, des travaux à l'échelle du système de culture ont montré qu'il était possible de concilier revenu et réduction d'intrants chimiques en particulier par l'utilisation de variétés rustiques dans des itinéraires techniques adaptés.
- 24) Pour l'ensemble des production végétales, ce n'est pas vers des "solutions alternatives" à l'emploi des pesticides qu'il est souhaitable de se tourner, mais vers une autre façon de penser la production et la protection, afin de rendre la production moins vulnérable, et la protection plus efficace (techniquement) et efficace (économiquement, au plan environnemental, au plan social, au plan des performances à long terme des systèmes). Le paradigme de protection intégrée est dépassé dans beaucoup de cercles, où il est remplacé par celui de production intégrée.
- 25) Le génie génétique - conçu d'une manière simpliste : la création par transgénèse de variétés totalement résistantes à tel bio-agresseur - est potentiellement porteur "d'alternatives à l'utilisation de pesticides"; les auteurs de ce chapitre ne se considèrent pas comme spécialistes de ce domaine, mais ils relèvent que des avancées considérables dans ce domaine ont lieu dans le monde, avec des résultats qui, pour certains, semblent prometteurs ; ignorer ces avancées serait dommageable à la recherche dans ce domaine.
- 26) Il existe d'importants besoins de produits (c'est-à-dire, d'agents biologiques formulés) pour la lutte biologique qui ne sont pas couverts, alors que les résultats scientifiques disponibles indiquent l'efficacité de ces produits.
- 27) Les principes d'une protection non chimique sont, essentiellement, connus (connaissance des cycles, effets qualitatifs des principales techniques). Par contre, leur intégration cohérente au sein d'un itinéraire technique, et plus largement dans le cadre de systèmes de culture, pour une gamme large d'objectifs et de contraintes, n'a pas bénéficié à ce jour d'efforts de recherche et de développement suffisants.
- 28) La protection intégrée des cultures est fondée non pas sur des avancées technologiques ponctuelles, mais sur la mise en œuvre d'un large éventail de connaissances techniques, biologiques, et économiques ; à ce titre elle est valorisante pour les acteurs de la production et de la protection végétale, en particulier, les agriculteurs.
- 29) La notion de "méthode alternative" en soi est préoccupante, et ce à deux égards : d'une part, parce qu'elle suggère implicitement l'existence d'une solution unique et exclusive pour la protection des plantes, d'autre part, parce qu'elle suggère que ces solutions se déploieraient de manière simple.
- 30) Il n'y pas de méthode unique pour la protection des plantes; les accidents passés et l'impasse de la protection chimique dans certains cas actuels en sont l'illustration. Une combinaison de méthodes est, au contraire, à rechercher. Ceci requiert une transformation des pratiques importante et difficile : on ne déploie pas un ennemi naturel dans un système de culture, on ne met pas en œuvre une succession culturale, aussi facilement que l'on traite un sol ou une culture.

4.7.2. Conclusions du Chapitre 4

C'est dans une très large mesure sur la prise en compte de risques, perçus ou réels, dans le court terme, que la protection des cultures en France est aujourd'hui, fondée. Une conclusion peut s'articuler sur ces deux points : la réalité des risques que les bio-agresseurs de plantes cultivées constituent, d'une part, et l'échéance de ces risques, d'autre part. Un troisième point d'articulation, essentiel parce qu'il explique largement les deux premiers, est repris à la fin de cette conclusion, concerne les contextes dans lesquels ces perceptions et ces échéances sont conçues.

La production végétale, donc la protection végétale, s'inscrivent dans un contexte où les normes de production - économiques, sociales, environnementales - sont à la fois contraignantes dans l'instant, ce qui restreint considérablement l'éventail des choix, et fluctuantes dans le temps, ce qui rend une stratégie de long terme souvent impraticable ou inopérante pour les opérateurs de la protection des cultures. Le tissu scientifique et technique sur lequel s'appuie la protection des cultures est empreint des succès passés, et réels, obtenus grâce à l'emploi de produits chimiques. Mais cette vision occulte les succès, tout aussi réels, bien plus anciens, et de ce fait autrement durables, des pratiques culturales et de l'amélioration génétique pour contrôler les bio-agresseurs des plantes cultivées.

Ainsi par exemple, la réflexion se focalise souvent sur l'émergence de tel bio-agresseur et du risque qu'il représente pour telle culture. Ce type de question, puissamment relayée par les producteurs, a une réalité tout à fait immédiate ; mais trop rarement mesure-t-on que la plupart des plantes cultivées aujourd'hui ne sont attaquées que par un nombre très réduit de bio-agresseurs. Le nombre de bio-agresseurs potentiels d'une culture a été encore réduit par l'effort continu de la sélection variétale depuis la domestication des espèces : on ne mesure plus aujourd'hui le fait que les cultures de blé d'hiver ne sont plus susceptibles, comme elles l'étaient il y a un siècle, d'être anéanties par la rouille noire, la rouille jaune, les maladies systémiques des épis, et tout un ensemble de bio-agresseurs du sol ou transmis par les semences. Dans une très large mesure, l'amélioration variétale menée au cours du siècle passé a très fortement contribué aux performances des couverts végétaux actuels, et l'agriculture d'aujourd'hui s'appuie encore sur ces acquis.

De la même manière, les pratiques agricoles, directement ou indirectement, permettent de réduire les populations initiales de bio-agresseurs dans les sols, dans les semences, stimulent les antagonismes existant spontanément dans un agrosystème cultivé, et réduisent efficacement la vitesse des dynamiques de bio-agresseurs. Ces effets, malheureusement, ne sont mesurables qu'au fil des enchaînements de saisons, et les exploiter requiert une connaissance approfondie du fonctionnement des agro-écosystèmes, ou d'un savoir-faire qui peut être compromis dans son exécution par une trop rapide évolution des contextes ou des règles de production.

Ce chapitre insiste sur la notion de perte de récolte comme fondement de la protection des cultures, comme seule référence objective d'une décision. Il précise que "perte de récolte" n'est pas à confondre avec "perte de rendement", le premier englobant l'autre, de même que d'autres éléments qui permettent de caractériser la réduction des performances des peuplements végétaux cultivés, dont les pertes de qualité (aspect des récoltes, caractéristiques de conservation, valeur nutritionnelle ou organoleptique, qualité sanitaire des produits). Ce point est à nos yeux essentiel : c'est bien parce que les bio-agresseurs provoquent des pertes de récolte que des méthodes pour les contrôler - donc, pour limiter les pertes de récoltes - sont nécessaires.

Ce chapitre insiste sur le fait que nous ne disposons pas de données adéquates (quantitatives, systématiques, régulières, en nombre suffisant pour avoir une quelconque représentativité) pour estimer les pertes de récoltes (les dommages) occasionnées par les bio-agresseurs des cultures. Cette lacune a notamment pour conséquence d'empêcher d'évaluer l'efficacité des méthodes de contrôle qui sont actuellement utilisées, et donc de comparer objectivement l'efficacité de méthodes de lutte chimiques par rapport à d'autres. Elle a aussi pour conséquence d'empêcher une réflexion tournée vers l'avenir, et d'autres façons de protéger les cultures.

Ce chapitre ne s'érige pas comme une critique de l'emploi des pesticides en agriculture : leur efficacité est suffisamment démontrée pour qu'il ne soit pas nécessaire de la documenter encore. Mais ce chapitre insiste sur le fait que l'efficacité même des produits pesticides, la facilité avec laquelle ils peuvent être utilisés mènent à des effets pervers, de deux types. A court terme, ils tendent à supplanter

la mise en œuvre d'autres méthodes, moins faciles à utiliser, ou dont l'efficacité immédiate n'est pas aussi flagrante. A long terme, ils favorisent le développement de manières de produire et de protéger qui sont des non-sens agronomiques, économiques, ou environnementaux - au sens où ces différents éléments ne sont plus pris en compte. Depuis plusieurs décennies, l'agriculture française, et la recherche qui l'accompagne, se développent sous un écran de produits chimiques qui masquent ces réalités agronomiques, économiques, et environnementales. Dépendre autant d'un seul instrument de contrôle, qui de surcroît empêche l'élaboration d'autres raisonnements, est intrinsèquement dangereux. La notion de "méthode alternative" en soi est préoccupante, et ce à deux égards : d'une part, parce qu'elle suggère implicitement l'existence d'une solution unique et exclusive pour la protection des plantes, d'autre part, parce qu'elle suggère que ces solutions se déploieraient de manière simple. Il n'y pas de méthode unique pour la protection des plantes ; les accidents passés et l'impasse de la protection chimique dans certains cas actuels en sont l'illustration. Une combinaison de méthodes est, au contraire, à rechercher. Ceci requiert une transformation des pratiques importante et difficile : on ne déploie pas un ennemi naturel dans un système de culture, on ne met pas en œuvre une succession culturale, aussi facilement que l'on traite un sol ou une culture.

Chaque fois que cela a été possible, ce chapitre illustre les possibilités d'envisager d'autres façons de produire et de protéger les cultures. Nous insistons sur le fait que le recours aux pesticides est un élément essentiel pour la protection des cultures, d'une part ; et que leur emploi devrait constituer l'ultime recours d'une situation devenue incontrôlable autrement, d'autre part.

Le dernier point d'articulation de cette conclusion, les contextes dans lesquels ces perceptions et ces échéances sont conçues, est illustré par les différents types de productions végétales. On mesure bien combien la marge de manœuvre diffère entre les exemples qui sont traités ici. Mais, même dans les cas où celle-ci paraît extrêmement étroite - la vigne, les cultures maraîchères, beaucoup de productions fruitières pérennes - il y a lieu de s'interroger sur le poids des contextes de production sur l'usage de pesticides qui y est actuellement fait. Plus spécifiquement, il serait salutaire de lister les exigences (1) des systèmes de commercialisation des produits agricoles, (2) de la demande véritable des consommateurs, et de leur information, (3) des systèmes de commercialisation internationaux, (4) des agriculteurs, et (5) des systèmes d'approvisionnement en intrants, en s'interrogeant sur leur caractère contradictoire, et en hiérarchisant les objectifs que véritablement la protection des cultures couvre.

4.7.3. Perspectives pour la recherche

Trois éléments de prospective sont avancés ici : intégration, analyse de systèmes complexes, systèmes de gestion. Ces éléments concernent la recherche que pourrait mener l'INRA, en particulier, mais également les institutions de recherche liées au monde agricole en général, dans le domaine de la construction, de l'évaluation, et de la mise en œuvre de stratégies de gestion des bio-agresseurs.

Le premier point est que des besoins existent aujourd'hui, qui sont censés s'accroître demain, pour voir les instruments d'une gestion des bio-agresseurs des cultures participer à une agriculture durable. Ce chapitre a évoqué la notion d'intégration à différents égards : celle des méthodes de gestion des bio-agresseurs dans les systèmes de production, celle des méthodes de contrôle dans des stratégies à différents pas de temps, notamment. Dans ce chapitre, nous avons évoqué la nécessité de prendre en compte non seulement les contextes où la production végétale a lieu, mais aussi le fait que l'on a plus souvent affaire à une combinaison de bio-agresseurs qu'à un bio-agresseur en particulier ; et l'on a évoqué les relations qui existent entre les profils de bio-agresseurs, les situations de production, la vulnérabilité des peuplement végétaux, les dégâts, les dommages et les pertes qui peuvent survenir ; tous ces éléments sont liés, d'une part, et sont variables, d'autre part. La caractérisation, l'analyse et la compréhension en vue de la gestion d'une structure aussi complexe ne relève sûrement pas d'une seule discipline, mais de plusieurs ; également, elle fait appel à des démarches scientifiques différentes.

Les situations de production sont vouées à évoluer, sous l'effet de facteurs environnementaux (forces de changement globales, dont climatique et commerciale), d'accidents (introductions), de politiques agricoles, et de réglementations. Beaucoup de ces facteurs sont, au moins dans une certaine marge,

prévisibles aujourd'hui : dans beaucoup de cas, les questions qui se posent ne se formulent pas par des "si" mais par des "lorsque". C'est donc d'un champ de recherche complexe et multidisciplinaire qu'il s'agit, destiné à guider ou tout au moins à rationaliser scientifiquement les stratégies d'aujourd'hui, et aussi à préparer des futurs possibles. La notion d'ICM (Integrated Crop Management), avec ses implications de démarche scientifique systémique, pluridisciplinaire et de gestion à long terme semble constituer un cadre adéquat pour mener ce travail. Une question centrale serait d'y construire des systèmes de gestion des bio-agresseurs qui s'intègrent et contribuent à la durabilité des agrosystèmes, avec toutes les dimensions qu'il faut donner à cette expression. C'est un enjeu de science difficile, mais important, partagé par une communauté internationale sans doute éparse mais étendue ; c'est aussi un enjeu majeur d'applications.

Deux dimensions n'ont pas été complètement discutées dans ce chapitre, celle du temps et de l'espace. Quant à l'espace, nous avons limité notre réflexion à des objets facilement palpables, et spécialement, la parcelle cultivée. Ce serait une grave erreur de penser que la gestion des bio-agresseurs ne s'applique qu'à cette échelle-là, et espérons que ce n'est pas ce que le lecteur perçoit des éléments ci-dessus. Prendre en compte des échelles spatiales sensiblement plus grandes est souvent nécessaire, parfois indispensable, comme c'est le cas des bio-agresseurs qui peuvent être dispersés entre parcelles (par des éléments naturels ou anthropiques). Le fait de s'intéresser à des territoires plus vastes que la parcelle agricole implique de considérer plusieurs acteurs susceptibles de modifier l'aménagement du paysage et les pratiques agricoles : groupe d'agriculteurs, mais aussi coopératives, collectivités locales, par exemple. Les stratégies de gestion collective nécessitent une coordination qui peut être parfois difficile à mettre en œuvre à cause des objectifs, parfois antinomiques, de ces différents acteurs. Ainsi, la gestion collective de gènes d'avirulence face à des gènes de résistance complète est-elle considérée par les économistes comme une ressource en propriété commune. Ceci peut engendrer des conflits d'intérêt entre agriculteurs. Individuellement, chaque agriculteur a en effet intérêt à utiliser le plus possible des résistances complètes, mais d'un point de vue collectif, ce comportement peut conduire à une perte d'efficacité rapide des résistances utilisées. Il nous semble donc nécessaire de développer des méthodes et des outils pour aider au développement d'approches collectives de la protection des cultures dès lors que des échelles supérieures à celle de la parcelle sont considérées.

Quant au temps, notre propos s'est largement limité au cycle cultural d'une espèce donnée. Pour certaines productions (pérennes) où c'est le même peuplement qui vit les interactions avec les bio-agresseurs de saisons en saisons, un schéma de raisonnement qui ignorerait les successions de saisons serait invalide. Mais c'est également le cas pour toutes les productions végétales où les bio-agresseurs sont capables de survivre d'une saison à l'autre, c'est-à-dire, la presque totalité. La prise en compte de l'espace et du temps est à nos yeux un élément très important de l'analyse et de la compréhension des systèmes envisagés ici ; sans ces dimensions, il n'y aurait pas d'agriculture durable envisageable.