

SYSTÈMES DE PROTECTION DES CULTURES ET AGRICULTURE DURABLE

Serge SAVARY et Paul S. TENG

ORSTOM, laboratoire de phytopathologie tropicale, Montpellier
IRRI, Entomology and Plant Pathology Division, Philippines

Résumé

Les systèmes de protection des cultures sont des composants à part entière des agroécosystèmes, et doivent contribuer à leur durabilité. Il convient de noter que les échecs survenant en production des cultures surviennent, précisément, lorsque les stratégies de contrôle des ravageurs ne sont pas intégrées dans le contexte d'une situation de production. Différents agroécosystèmes sont comparés quant à leurs niveaux d'intensité et leurs systèmes de protection des cultures. En général, plus le système de production est intensif, et plus le système de protection est homogène, d'une efficacité moindre, et moins fiable à terme. La contribution des systèmes de protection à la durabilité des agroécosystèmes du futur dépendra de l'applicabilité de nouvelles (bio- et éco-) technologies. Elle dépendra aussi des lois des marchés et des infrastructures agricoles. Une démarche générale pour identifier des priorités en termes de risque phytosanitaire est exposée; et des techniques existent pour optimiser le mode de fonctionnement d'un agroécosystème. L'identification des termes de référence - les critères numériques d'une optimisation - vers une plus grande durabilité constituerait une avancée scientifique utile.

Une agriculture durable et ses composants

La protection des cultures contre leurs ravageurs ne constitue que l'une des multiples facettes d'un système de production agricole, qui forme un tout indissociable. Il est donc utile d'aborder rapidement la notion de durabilité de la production agricole, avant d'envisager celle de la protection des cultures, et son éventuelle contribution à la durabilité des agroécosystèmes.

Il existe un nombre impressionnant de définitions du terme « durabilité ». Cette diversité reflète la diversité des approches d'un problème très complexe - vraisemblablement, le plus important posé aux agronomes aujourd'hui. Elle reflète, aussi, des perceptions, des sensibilités et des intérêts divergents. L'objectif de cet exposé n'est pas d'entamer un débat sur la notion de durabilité; le concept est sans doute à la fois nécessaire et utile. La synthèse effectuée par Gene C. WILKEN (1) paraît un cadre satisfaisant pour aborder, plus spécifiquement, la protection des cultures dans un contexte adéquat.

Le concept d'agriculture durable affirme que la pérennité de la production dépend du maintien et de l'entretien des ressources sur lesquelles elle se fonde, la notion de ressources étant prise au sens le plus général possible. Le concept est dynamique : un agroécosystème devient plus ou moins durable, et le sens de l'évolution a plus d'importance que le statut du système à un instant donné. Parce qu'il est dynamique, il s'inscrit dans le contexte d'un accroissement rapide de la population mondiale et à la satisfaction de ses besoins.

La durabilité d'une agriculture est censée répondre à deux types de problèmes : ceux liés à une demande croissante, et ceux liés à une offre dont les ressources sont limitées. Le tableau 1 illustre le problème de la demande : d'une part, la population mondiale croît rapidement, et d'autre part, l'essentiel de cette croissance est urbaine. Le problème de l'offre est lié, pour une bonne part, à la disponibilité des terres arables. L'ensemble des terres éventuellement disponibles pour une production agricole est estimé à quatre milliards d'hectares, dont un milliard et demi d'hectares sont aujourd'hui cultivés (2) ; il s'agit, de manière prédominante, des meilleures terres disponibles. Selon les estimations de la Banque mondiale, en maintenant les rendements égaux à ce qu'ils sont aujourd'hui, il faudrait mettre en culture un total de deux milliards d'hectares en 2020 et de trois milliards d'hectares en 2050, pour assurer l'alimentation de la population mondiale. Le problème de l'offre est donc triple :

- il s'agit d'accroître la production globale;
- cette production accrue devra, nécessairement, mettre en œuvre des terres souvent fragiles;
- enfin cette production devra être soutenue sur un terme assez long - les scénarios démographiques à l'échelle mondiale sont si variables (2) qu'il est impossible de chiffrer cette échelle de temps.

Tableau 1. Population mondiale urbaine et rurale en millions.
(Source : ONU, Prospects of World Urbanization, 1988)

	Population en 1990			Population en 2020			Variation (%)		
	totale	urbaine	rurale	totale	urbaine	rurale	totale	urbaine	rurale
Monde	5 292	2 260	3 031	8 062	4 649	3 413	52	106	13
Développé	1 205	875	329	1 340	1 050	290	11	20	- 12
En développement	4 086	1 384	2 702	6 722	3 599	3 123	65	160	16
Dont :									
- Afrique	647	223	424	1 441	787	653	123	253	54
- Asie	2 985	835	2 149	4 550	2 206	2 344	52	164	9
- Amérique latine	448	324	123	719	600	118	60	85	- 4
- Océanie	6	2	4	11	5	6	83	150	50

Le concept d'agriculture durable aborde un problème si complexe qu'il contient en lui-même ses propres contradictions. Il y a, d'abord, des conflits de durée; les activités liées à la production agricole proprement dite couvrent une saison culturale, ou une année; la conservation des ressources nécessaires à cette production ne peut s'envisager qu'en termes de décennies; le concept de durabilité, lui, implique en principe une limite de temps indéfinie. Il y a, ensuite, conflits d'objectifs entre opérateurs : nombreux sont les gouvernements - ceux du Tiers Monde - où la croissance de la production constitue une priorité nationale; les producteurs, quant à eux, sont conscients des effets d'une telle croissance sur leurs revenus; l'accent mis sur les produits d'exportation peut, dans certains cas, pénaliser les consommateurs; dans les pays développés, le souci de protection de l'environnement s'oppose parfois aux objectifs de productivité; certaines productions agricoles s'effectuent dans le cadre d'exigences extrêmement strictes de qualité, et sont exposées aux aléas des variations de standards du marché. Enfin, alors que l'agriculture durable est censée accroître, dans le long terme, la stabilité des agroécosystèmes, les systèmes de production agricole durables nécessitent un tel raffinement de mise au point et d'intégration, et sont si spécifiques des agroécosystèmes, qu'ils manquent de souplesse quant à leur gestion, et peuvent comporter des risques de court terme conséquents.

La notion d'agriculture durable a le mérite de proposer un canevas pour la résolution des problèmes que posent les interactions entre différents composants d'un système extrêmement complexe. Elle n'a certainement pas l'ambition d'offrir de solutions immédiates, pour la résolution des problèmes que posent les interactions entre ses différents composants.

Un canevas d'analyse des systèmes de protection des cultures

Les systèmes de culture peuvent être caractérisés (3) grâce à des indices décrivant sommairement les situations de production, et en particulier, leur niveau d'intensification. Les systèmes de protection, qui en font partie, peuvent être décrits en considérant les techniques qui les composent, et en évaluant l'importance relative et l'efficacité de chacune de ces techniques.

Cinq critères ont été retenus pour décrire les situations de production (tableau 2) :

- (1) un indice de culture, variant de 1 (faible) à 3 (fort), représentant le nombre de cycles culturaux par an;
- (2) un indice d'homogénéité des cultures, assimilable (mais inverse) à un indice de biodiversité, qui inclut le niveau de polyculture, et la fréquence d'utilisation de variétés-populations ou de cultivars traditionnels, par opposition aux variétés améliorées à haut rendement. Cet indice varie de 1 (faible) à 3 (fort);
- (3) un indice d'utilisation de produits agrochimiques de synthèse, de 0 (pas d'utilisation) à 3 (utilisation intensive);
- (4) un indice de développement des infrastructures de soutien aux activités agricoles, (systèmes d'irrigation, réseau routier, etc.) variant de 0 (absentes) à 3 (fortement développées);
- (5) un indice de développement des systèmes de services, tels que les systèmes de crédit, la recherche privée ou publique, et les services de vulgarisation agricole, variant de 0 (absents) à 3 (fortement développés).

Tableau 2. Comparaison de différents systèmes de production en relation avec divers facteurs d'intensification, et des techniques de protection des cultures.

	Système traditionnel à base de riz (Philippines)	Système maïs-riz - arachide (Afrique de l'Ouest)	Système coton-maïs - arachide (Afrique del'Ouest)	Blé en monoculture (Centre-Ouest USA)	Betterave (Centre-Ouest USA)	Riz dans le delta du Mekong (Vietnam)
Indices d'intensification						
Indice de culture (1=faible,3=fort)	1	0,5	2	2	1	3
Homogénéité de culture (1=faible,3=fort)	1	1,5	2	3	3	3
Utilisation de produits agrochimiques (0-3)	0,5	0,5	1,5	1,5	3	3
Infrastructures (0-3)	0,5	0,5	2	3	3	3
Services	0,5	0,5	2	3	3	3
TOTAL	3,5	3,5	9,5	12,5	13	15

	Système traditionnel à base de riz (Philippines)	Système maïs-riz - arachide (Afrique de l'Ouest)	Système coton-maïs arachide (Afrique del'Ouest)	Blé en monoculture (Centre-Ouest USA)	Betterave (Centre-Ouest USA)	Riz dans le delta du Mekong (Vietnam)
Techniques* de protection des cultures						
Résistance de la plante-hôte	1 - 3	0,5 - 1	1,5 - 1,5	3 - 3	3 - 1	2 - 1
Pesticides	0,5 - 0,5	0 - -	2,5 - 1,5	0,5 - 0,5	3 - 0,5	3 - 1
Pratiques culturales	3 - 3	1,5 - 2	2 - 1,5	0,5 - 0,5	1 - 1	1 - 0,5
Antagonistes naturels - lutte biologique	1 - 3	1 - 2	0,5 - 0,5	0 - 0	0 - 0	1 - 1
Pratiques traditionnelles/rituelles	3 - 1	3 - 1	2 - 1	0 - 0	0 - 0	1 - 1
TOTAL	8,5 - 10,5	6 - 6	8,5 - 6	4 - 4	7 - 2,5	8 - 4,5

* Le premier chiffre indique l'importance et la fréquence d'utilisation; le second est une mesure d'efficacité des techniques.

Les systèmes de protection sont décomposés en cinq groupes de méthodes de lutte contre les ravageurs des cultures : l'emploi de variétés résistantes, l'utilisation de pesticides, les pratiques culturales, le contrôle par les antagonistes naturels et la lutte biologique, et les techniques traditionnelles, y compris rituelles. Dans chacun des systèmes de production envisagés, les différents types de méthodes sont classés par un indice double : importance-efficacité.

La somme des différents indices permet de comparer les situations de production, d'une part, et les systèmes de protection contre les ravageurs, d'autre part. Le tableau 2 indique, de gauche à droite, un gradient d'intensité des systèmes de production. Il indique, également, un déclin progressif de l'efficacité générale des systèmes de protection, associé à une uniformisation des méthodes de contrôle des ravageurs.

Quelques exemples

La culture traditionnelle du riz aux Philippines

Il existe encore des systèmes traditionnels à base de riz aux Philippines. Les méthodes de contrôle des ravageurs sont essentiellement prophylactiques : une mise en place progressive, au cours de la saison, des cultures; des cultures de bordure (souvent, du taro), au pourtour des parcelles de riz; l'association, dans une même parcelle, de variétés différentes, présentant des réactions différentes aux ravageurs; l'association, avec le riz, d'autres cultures; l'utilisation de pesticides d'origine indigène; l'enfumage des champs, grâce à un combustible contenant des agents répulsifs naturels; le maintien de populations spontanées d'antagonistes des ravageurs; l'utilisation de pièges mécaniques. Disséminés parmi ces pratiques, les rituels traditionnels jouent un rôle important, qui peut contribuer indirectement à la protection de la culture.

Le système maïs-riz-arachide en Afrique de l'Ouest

Dans les zones de savanes humides d'Afrique de l'Ouest, un système traditionnel de culture est constitué par l'association de cultures de maïs, de riz pluvial, et d'arachide. En raison de périodes de jachères parfois très longues, l'indice de culture y est bas, avec une homogénéité de culture faible. Le système comporte également un composant élevage important, assurant une fumure organique généralement suffisante. Les infrastructures et les services sont extrêmement limités. Le contrôle des ravageurs est associé à un certain niveau de résistance partielle, ou de tolérance, aux dégâts occasionnés par les maladies et les insectes. Les pratiques culturales incluent un certain nombre d'opérations, telles que le brûlis ou le travail du sol, qui ont pour objectif essentiel, ou complémentaire, la gestion de certaines contraintes phytosanitaires, tout spécialement les mauvaises herbes - dans ce système, comme dans beaucoup d'autres apparentés, le désherbage peut représenter jusqu'à 50 % du temps de travail.

Le système cotonnier-maïs-arachide en Afrique de l'Ouest

L'introduction du coton dans ce système de subsistance traditionnel a entraîné son intensification, et son évolution vers un rôle prépondérant de la culture d'exportation. Les périodes de jachères sont considérablement plus courtes, l'indice de culture est plus élevé, et l'emploi d'engrais synthétiques est la règle. Bien que le nouveau système conserve certains des composants du système initial, le maïs et l'arachide en particulier, l'indice d'homogénéité de culture est accru. Le système implique un accroissement substantiel des intrants (les engrais, les insecticides et les herbicides utilisés pour la production de coton), et une amélioration sensible des infrastructures et des services. En termes de protection des cultures, le nouveau système met en œuvre un niveau plus élevé de résistance aux insectes et aux maladies (en particulier pour le maïs), et s'appuie fortement sur les insecticides (pour le coton), aux dépens de mécanismes de stabilisation spontanés. La mécanisation des opérations de travail du sol, largement répandue, contribue sans doute également à la limitation de certaines espèces de ravageurs.

La betterave à sucre dans le Centre-Ouest des Etats-Unis

Une importante zone de culture de betterave à sucre aux Etats-Unis est constituée par la vallée de la Red River dans le Minnesota et le Dakota du Nord, où les été chauds et les automnes frais constituent des conditions climatiques idéales pour l'accumulation de sucre. Il s'agit, dans ces zones, d'une monoculture, avec une utilisation intensive d'intrants, en particulier de fongicides contre la cercosporiose. Dans les années 70, des variétés à haut rendement, et présentant relativement peu de résistance à la maladie, étaient cultivées sous une couverture fongicide essentiellement constituée de benzimidazoles. En 1981, une épidémie sérieuse, responsable de pertes de rendement de l'ordre de 50 % eut lieu, attribuable directement à l'établissement de souches résistantes à l'action du fongicide, se traduisant par un échec généralisé de cette tactique de protection (4). Cet

exemple classique d'accident en protection des cultures, lié à une trop forte dépendance vis-à-vis d'un seul composant de gestion a mené à la recherche de solutions intégrées. Aujourd'hui, le contrôle de la maladie se fonde sur l'emploi de variétés à rendement modérément élevé, sur l'utilisation de fongicides non systémiques, dont l'application est guidée par un système d'avertissement climatique, un suivi régulier des cultures, et une meilleure connaissance des relations dégâts-perdes de récoltes (5).

Le riz irrigué dans le delta du Mékong, au Viêt-nam

Avec jusqu'à trois cycles par an, et un régime intensif d'engrais et de pesticides synthétiques, le delta du Mékong est sans doute l'une des zones de riziculture les plus intensives d'Asie du Sud-Est. Des explosions de populations de cicadelles brunes y provoquent régulièrement des pertes de rendement importantes. Depuis 1986, ces attaques sont plus fréquentes, tandis que l'utilisation d'insecticides à large spectre s'accroît. Dans ce système, l'utilisation de fongicides, visant la pyriculariose et le flétrissement des gaines est pratique courante (6). Depuis peu, un syndrome de jaunissement des feuilles, dont la cause est encore inconnue, affecte des milliers d'hectares. Les premiers résultats acquis par l'IRRI indiquent une association entre ce syndrome et l'apport d'engrais azoté en relation avec les conditions édaphiques. L'élaboration de systèmes de protection intégrés pour des zones telles que celles-ci constitue un objectif de recherches crucial. Ces systèmes devront s'intégrer dans un programme de gestion des ressources, à la fois physiques et biologiques, du milieu et notamment du sol.

Le blé dans le Centre-Ouest des Etats-Unis

Le blé est cultivé de manière extensive dans la région des prairies des Etats-Unis. Le système présente cependant certains aspects d'intensification : il y a peu de rotations, et un apport régulier d'engrais synthétiques est effectué. Pratiquement aucun pesticide n'est employé, et la protection des cultures - ici, contre les rouilles des céréales - est liée essentiellement à l'emploi de variétés résistantes. Cette dépendance presque exclusive s'est sans doute, jusqu'ici, avérée efficace du fait d'une rotation implicite de nouvelles sources de résistance avec la vulgarisation régulière de nouvelles variétés. Par ailleurs, en particulier dans la région la plus septentrionale, les étés courts ne se prêtent qu'à un nombre limité de cycles parasitaires dans une saison culturale, et les hivers, très rigoureux, contribuent à restreindre les sources d'inoculum locales.

Évolution des systèmes de protection des cultures : problèmes généraux

Les ravageurs et la notion de risque en agriculture

Une mesure du risque que représentent les ravageurs des cultures est constituée par les pertes de rendement qu'ils occasionnent. La notion de perte de récoltes est liée à celle de rendement potentiel, accessible, et réel (figure 1). Le rendement potentiel est déterminé par un ensemble de facteurs physiques (température et rayonnement, en

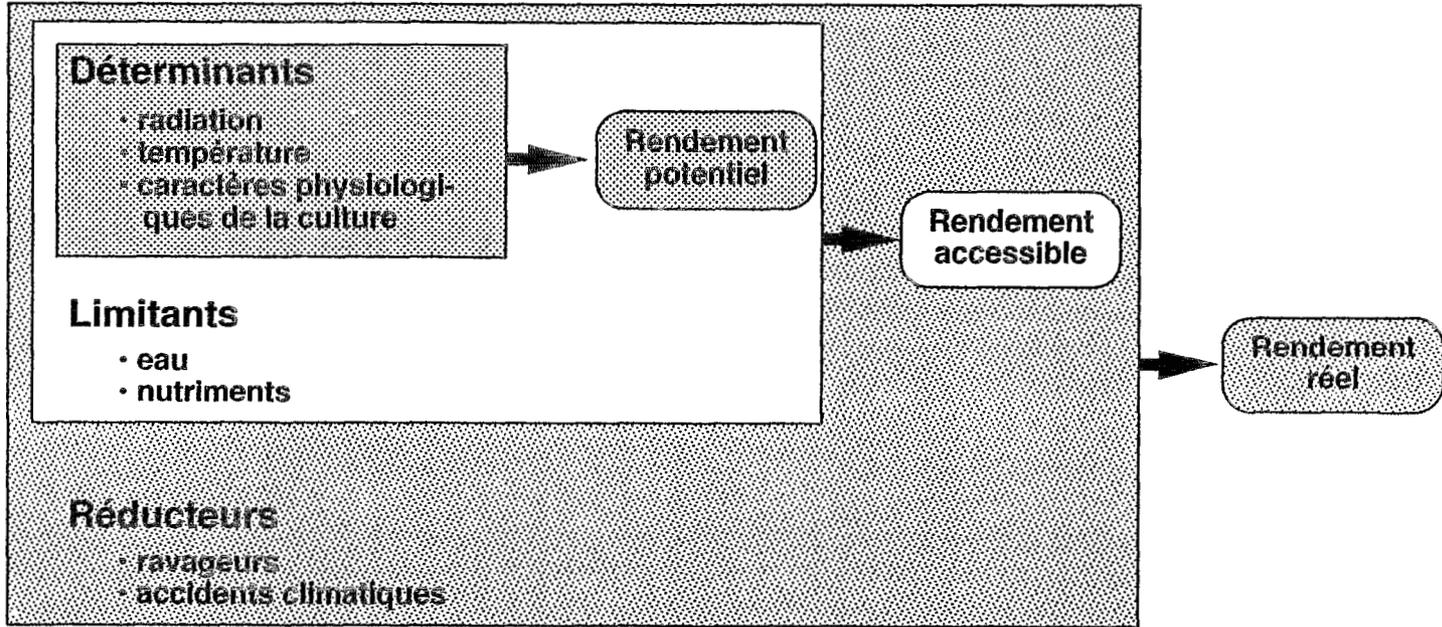


Figure 1

Facteurs déterminant les variations du rendement. Trois groupes de facteurs sont distingués : les facteurs qui déterminent le rendement, ceux qui le limitent, et ceux qui le réduisent.

particulier) et physiologiques (paramètres de la photosynthèse et de la respiration), qui sont génétiquement fixés pour une plante donnée. Le rendement accessible prend en compte un certain nombre de facteurs qui limitent l'expression d'un génotype dans une situation de production donnée : l'alimentation hydrique et minérale, en particulier. Le rendement réel incorpore les réductions associées aux ravageurs, ou aux calamités climatiques (7). La définition utilisée par la FAO (8) pour une perte de récoltes est l'écart qui sépare le rendement accessible du rendement réel. D'autres indices pourraient être envisagés : les ravageurs des cultures ont des impacts économiques, sociaux, et parfois politiques (9).

Une définition opérationnelle du risque exprimée en tonnes par hectare présente néanmoins l'avantage d'une certaine neutralité, et permet des comparaisons. Ce n'est que récemment que la notion de risque - au sens industriel du terme - a été appliquée en agriculture (10). Un risque peut se décomposer comme le produit de deux termes : son amplitude, et sa probabilité. En protection des cultures (11), l'amplitude du risque est constituée par la perte de récolte associée à un niveau de contrainte phytosanitaire donnée dans une situation de production précise. La probabilité du risque est celle de voir apparaître ce niveau de contrainte phytosanitaire particulier au cours d'un cycle cultural donné.

Intensification agricole et évolution du risque en amplitude

La durabilité de l'agriculture doit également être perçue dans un contexte d'accroissement de la production (1), en particulier dans les pays en développement. Il semble donc opportun d'évoquer ici les conséquences que peut avoir un processus d'intensification agricole dans une perspective de protection des cultures. Un processus d'intensification peut se résumer à une série d'étapes successives, au cours desquelles de nouvelles technologies sont incorporées de manière à accroître l'efficacité d'un système de production.

Chaque modification d'une étape implique une variation du risque associé à l'ensemble du processus d'intensification. Il existe, malheureusement, assez peu d'études abordant le risque lié aux étapes successives d'un processus d'intensification considéré dans son ensemble. Un exemple est celui de la production d'arachide en Afrique de l'Ouest, où un itinéraire d'intensification a été proposé (12) : (1) un désherbage mécanique ou manuel régulier; (2) un accroissement de la densité de semis, et (3) un accroissement de l'apport d'engrais synthétique. La figure 2 illustre l'évolution de l'amplitude du risque associé à ce canevas, avec un accroissement sensible des pertes de rendement attribuables au complexe de maladies foliaires de l'arachide, parmi lesquelles figure, en premier lieu, la rouille de l'arachide (*Puccinia arachidis*). Cet accroissement est, en fait, plus rapide que n'est celui des rendements eux-mêmes, si bien que ce processus ne peut être envisagé sans mesures de protection complémentaires (13).

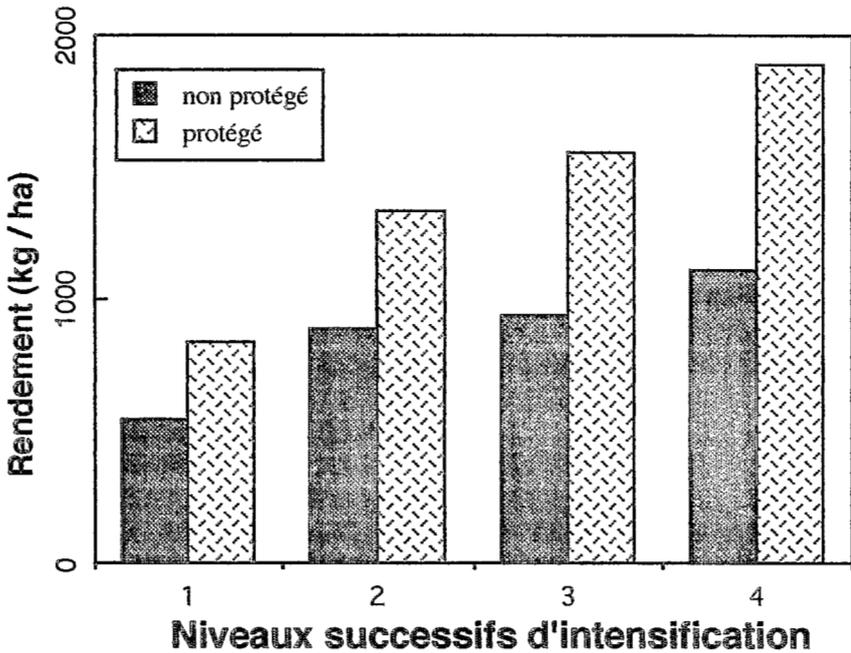


Figure 2

Évolutions des rendements en arachide en fonction de niveaux successifs d'intensification. L'écart entre rendements protégés ou non indique les pertes de récoltes causées par les maladies.

Les effets spécifiques de certains facteurs d'intensification ont par contre fait l'objet d'études détaillées, ainsi par exemple le raccourcissement des rotations de pomme de terre et l'infestation par les nématodes *Globodera pallida* et *G. rostochiensis* (14), ou encore les effets de la fumure azotée et la bactériose du riz causée par *Xanthomonas oryzae* (15).

Il est généralement admis, et vérifié par les faits, que l'accroissement du rendement accessible - c'est-à-dire, de l'objectif de rendement - est associé à un accroissement correspondant du risque en amplitude, c'est-à-dire des pertes de récoltes que les ravageurs peuvent infliger à la culture (16). L'IRRI et l'ORSTOM collaborent actuellement à l'établissement d'une base de données expérimentale sur les pertes de récoltes occasionnées par un ensemble de maladies, d'insectes, et de mauvaises herbes du riz, à différents niveaux de production. Cette base de données est fondée sur une série d'expériences successives, dans lesquelles différentes combinaisons de composants des pratiques culturales, et différents ravageurs sont impliqués tour à tour.

Une analyse factorielle des correspondances permet de résumer quelques-uns des éléments de cette base de données, quant aux relations entre rendements réels (R) et rendements accessibles (Ra), et aux pertes de rendement (P). Le diagramme de la

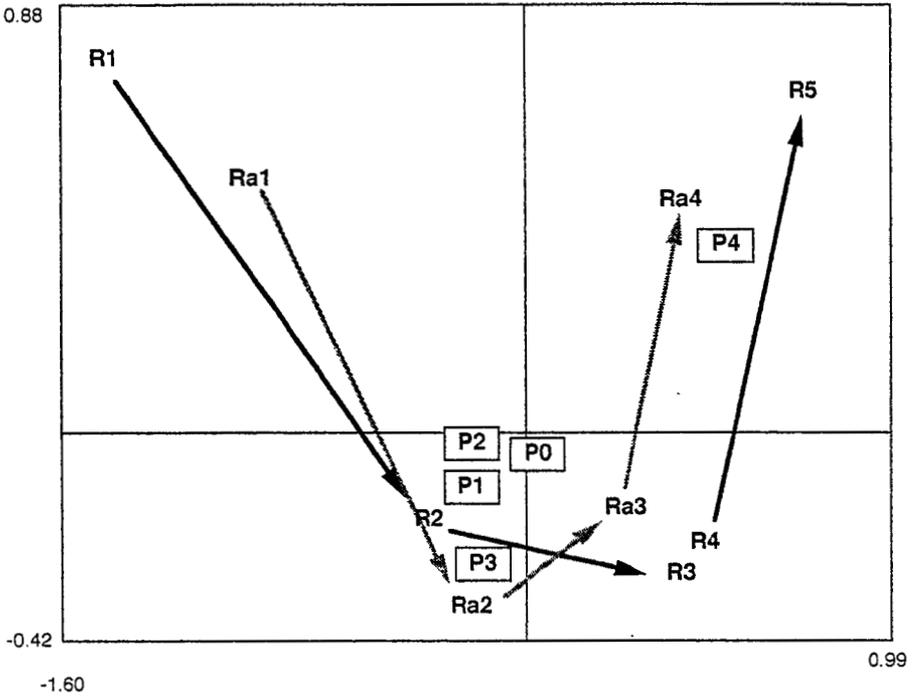


Figure 3

Une analyse factorielle des correspondances entre rendements réels (R1 à R5), rendements accessibles (Ra1 à Ra4) et pertes de récoltes (P0 à P5). Les données proviennent d'une base de données expérimentale sur les pertes de récolte causées par les ravageurs (insectes, maladies et mauvaises herbes) du riz irrigué et inondé établie à l'Institut international de recherche sur le riz (IRRI), aux Philippines.

figure 3 montre, bien sûr, la très forte association entre rendements accessibles et réels. Mais elle montre aussi que les risques d'amplitudes élevées (P4) sont associés de manière privilégiée à des cibles de rendement élevées (Ra4).

Parallèlement à la relation générale qui lie les rendements accessibles, et les rendements réels, certaines situations particulières méritent d'être prises en considération. Dans le cas du riz, il semble qu'un risque d'amplitude élevée soit associé à certains ravageurs, ou certaines combinaisons de ravageurs, tandis que d'autres combinaisons sont associées à un risque d'amplitude marginale. En pratique, parmi la gamme extrêmement large des ravageurs qui affectent le riz irrigué en Asie du Sud et du Sud-Est, le tungro, provoqué par deux particules virales transmises par la cicadelle verte (*Nephotettix* spp.), occupe une place particulière en raison de l'amplitude considérable du risque qu'il constitue. Un autre risque, dont l'amplitude va croissant avec le rendement accessible de la culture, et en particulier, avec un apport d'azote élevé, est associé au flétrissement des gaines causé par *Rhizoctonia solani*.

Intensification agricole et évolution du risque en probabilité

On peut également envisager l'impact des processus d'intensification sur l'accroissement des populations de ravageurs proprement dites, c'est-à-dire, sur la probabilité du risque. Il existe à cet égard un parallèle entre les deux principales cultures céréalières du monde, le blé et le riz. Dans les deux cas, l'intensification se fonde sur de nouvelles variétés, dont les tiges sont courtes, avec un indice de récolte élevé. Ces variétés à paille courte sont capables de porter des rendements élevés grâce à des apports importants d'engrais, spécialement azotés. Le contenu en azote des plantes est accru; ces plantes petites sont plus proches des sources d'inoculum des maladies telluriques; ces cultures denses, avec un indice foliaire élevé constituent des habitats qui, habituellement, sont favorables au développement des maladies (16; 17; 18). L'intensification agricole est ainsi souvent perçue comme étant associée, de manière inhérente, à un accroissement des problèmes associés aux ravageurs. Il semble qu'une perception plus équilibrée soit désirable. Dans le cas du riz, par exemple, le contraste entre le champ du « paysan pauvre », où l'helminthosporiose, favorisée par les stress hydriques, le manque d'azote, et des carences minérales, est omniprésente, et celui du « paysan riche », avec ses problèmes de pyriculariose et de flétrissement des gaines est bien connu (18; 19).

Le rôle des infrastructures et des services

L'évolution des systèmes de production agricoles constitue un processus discontinu par nature : de nouvelles pratiques sont testées, mises en œuvre, puis intégrées chacune à leur tour. Les systèmes de production que nous connaissons aujourd'hui résultent, pour une très large part, des essais successifs effectués par les agriculteurs sur une échelle de temps de plusieurs millénaires. La recherche agronomique moderne a permis d'accélérer ce processus de tri et d'évaluation, face aux demandes, souvent pressantes, de l'instant (20). Un nouveau paradigme de la recherche agronomique consiste à reprendre en compte l'importance de l'agriculteur-chercheur, et à l'impliquer dans l'amélioration, ou l'adaptation d'un système qu'il utilise déjà, dans un environnement qu'il connaît. Le programme inter-Etats de la FAO pour la lutte intégrée contre les ravageurs du riz est fondé sur ce principe (21).

Il y a controverse, dans les milieux de la protection des cultures, quant au degré d'implication que les agriculteurs devraient avoir dans l'élaboration de systèmes de protection. Le succès du programme de lutte intégrée de la FAO en Indonésie est, en partie, fondé sur une implication étroite : le nouveau savoir - celui qui est appliqué en pratique dans les champs - ne vient pas des systèmes de vulgarisation, et encore moins de la recherche, mais des agriculteurs eux-mêmes, avec l'appui des institutions locales, grâce à la création d'« écoles villageoises ». Un tel appui constitue cependant une entreprise majeure. Ce projet n'a pas rencontré de succès dans d'autres pays d'Asie du Sud-Est, principalement en raison de la faiblesse des services et des infrastructures d'appui à l'agriculture.

Un contexte particulièrement favorable pourrait être celui où, d'une part, les agriculteurs seraient en mesure de prendre eux-mêmes des décisions tactiques (en cours de cycle cultural) concernant leur exploitation, tandis que les services d'appui viendraient en aide aux communautés agricoles pour appuyer les décisions tactiques (avertissements climatiques, par exemple) et formuler des décisions stratégiques (avant l'établissement d'une campagne). Ces dernières concerneraient en particulier les ravageurs migrants, tels que la cicadelle brune du riz, ou les rouilles des céréales, et porteraient par exemple sur les dates de mise en place des cultures, les types de variétés à déployer (et leurs caractéristiques de résistance; 22), ou les pesticides qui devraient être stockés en cas de situation d'urgence.

Intégration des méthodes de protection dans le système de production

L'évolution des sciences de la protection des cultures s'est effectuée au travers d'une succession de paradigmes (23). Peu après la seconde guerre mondiale, ces disciplines étaient fortement influencées par le paradigme chimiothérapique. Il est donc peu surprenant que la Révolution verte, qui était tournée d'abord et avant tout vers l'accroissement des rendements des céréales dans le monde tropical, ait été, historiquement, associée à l'emploi de pesticides pour la réalisation d'objectifs de rendements accrus. Il est cependant important de souligner que les deux phénomènes - l'adoption par les agriculteurs de variétés améliorées à haut rendement, et l'utilisation accrue de pesticides - ont été concomitants, mais non pas liés par des liens de causalité immédiate. Une étude détaillée, effectuée par P. KENMORE (24) sur l'adoption des variétés à haut rendement et sur l'utilisation de pesticides par les agriculteurs philippins, montre que l'apparition de l'emploi de pesticides a précédé, et non pas suivi, l'adoption des nouvelles variétés. Il est vrai, cependant, qu'une analyse plus fine, à l'échelle de la province (figure 4) suggère que les deux processus se sont, plus tard, renforcés réciproquement.

L'utilisation de plus en plus massive d'insecticides à large spectre, avec des traitements réguliers, est à l'origine de l'un des accidents les plus graves associé au mauvais emploi d'instruments de protection des cultures : l'explosion des populations de cicadelle brune du riz (*Nilaparvata lugens*) dans plusieurs pays du Sud-Est asiatique dans les années 1970. Les causes en sont simples : les pesticides utilisés sont à large spectre; les prédateurs naturels de la cicadelle sont plus sensibles aux pesticides que le ravageur lui-même; les traitements, appliqués de manière inconsidérée, et spécialement en début de cycle (voire sur les pépinières) détruisent les prédateurs naturels. La solution, elle aussi, est simple : ne pas traiter. Des expérimentations conduites aux Philippines, en Indonésie, et en Thaïlande, ont amplement montré que, dans la presque totalité des cas, ces traitements n'ont, au mieux, aucun effet. Les mécanismes de régulation naturels suffisent en soi pour assurer un contrôle des populations du ravageur, et les rendements obtenus sont au moins aussi bons si aucun insecticide n'est appliqué (21).

utilisation d'insecticides (%)

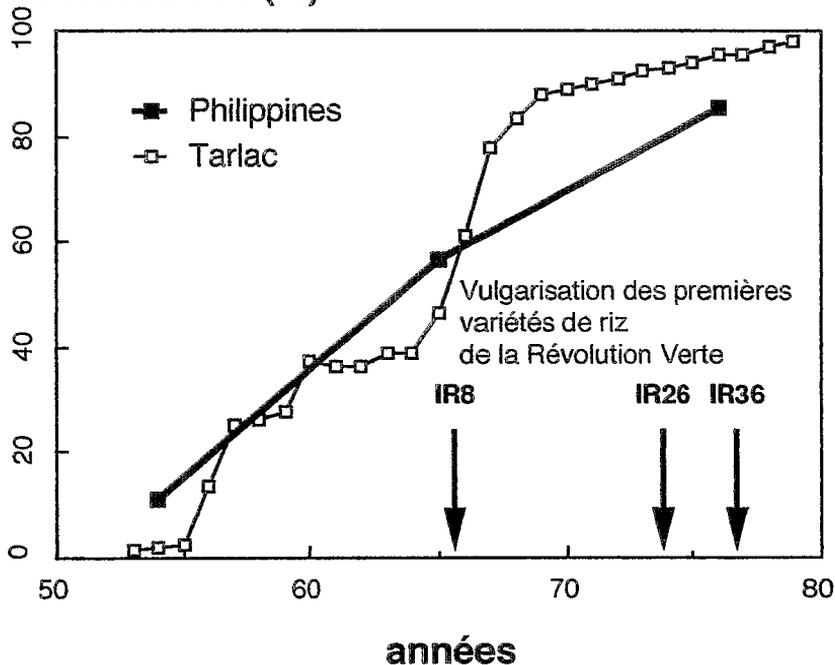


Figure 4

Évolutions de l'emploi d'insecticides (% d'agriculteurs effectuant au moins un traitement par cycle cultural) lors de la vulgarisation des premières variétés de riz améliorées à haut rendement aux Philippines, et dans une province (Tarlac) de ce pays (KENMORE *et al.*, 1987).

L'épidémie d'helminthosporiose du maïs de 1970 aux Etats-Unis constitue un autre exemple de mauvaise gestion des instruments de la protection des cultures (9; 25). Le gène mitochondrial de stérilité mâle 'Texas' (SMT), produit prestigieux de la sélection - et de ce qui, aujourd'hui, serait volontiers appelé « biotechnologie » (23) - permet d'éviter le castrage du parent maternel afin de produire les hybrides de la saison suivante, une opération qui coûte 500 à 2 500 F par hectare. A l'époque de l'épidémie, plus de 80 % des cultures de maïs des Etats-Unis portaient ce gène de stérilité mâle. Cette uniformité génétique fut à l'origine de la propagation foudroyante d'une souche particulière du parasite, et d'une épidémie majeure. Le résultat, un dommage équivalent à 15 % de la production totale annuelle, c'est-à-dire une perte évaluée à plus d'un milliard de dollars, avait été causé par un parasite jusque-là jugé marginal.

Ce second exemple reflète le risque associé à une confiance démesurée en la valeur technique d'une méthode isolée, et peut être qualifié d'accident technologique. Le contexte du premier exemple est plus délicat à appréhender. Il ne peut s'expliquer sans prendre en compte les conditions dans lesquelles les décisions sont prises par les agriculteurs, et l'environnement socio-économique de ces prises de décisions.

L'implication des agriculteurs dans les systèmes de protection des cultures

Les recherches sur la dynamique des populations de ravageurs, les pertes de récoltes, et les techniques de gestion des cultures, fournissent la base des recommandations en protection des cultures. Nombreux sont les facteurs qui déterminent la mise en œuvre effective de ces recommandations, et le principal est la manière dont les agriculteurs perçoivent les ravageurs. Parmi les composants envisageables d'un système de protection, un bon nombre, bien que d'une efficacité prouvée, sont d'une durabilité discutable, soit parce que les populations de ravageurs évoluent et les contournent, soit en raison de leurs effets secondaires sur les agroécosystèmes. C'est le cas de nombreux pesticides, mais également de certains types de résistance aux ravageurs. L'utilisation de tels composants dans un système de production est susceptible de le rendre non durable. L'adoption de ces composants est liée à la valeur rassurante que leur attribuent les agriculteurs. En réalité, un déterminant majeur de la mise en œuvre de stratégies durables de contrôle des ravageurs est une compréhension suffisante des perceptions des agriculteurs.

La figure 5 constitue le résumé d'une analyse sur les perceptions des agriculteurs de la plaine centrale de Luzon aux Philippines (26). Ce diagramme constitue une « cartographie » des préoccupations des agriculteurs en matière de protection de

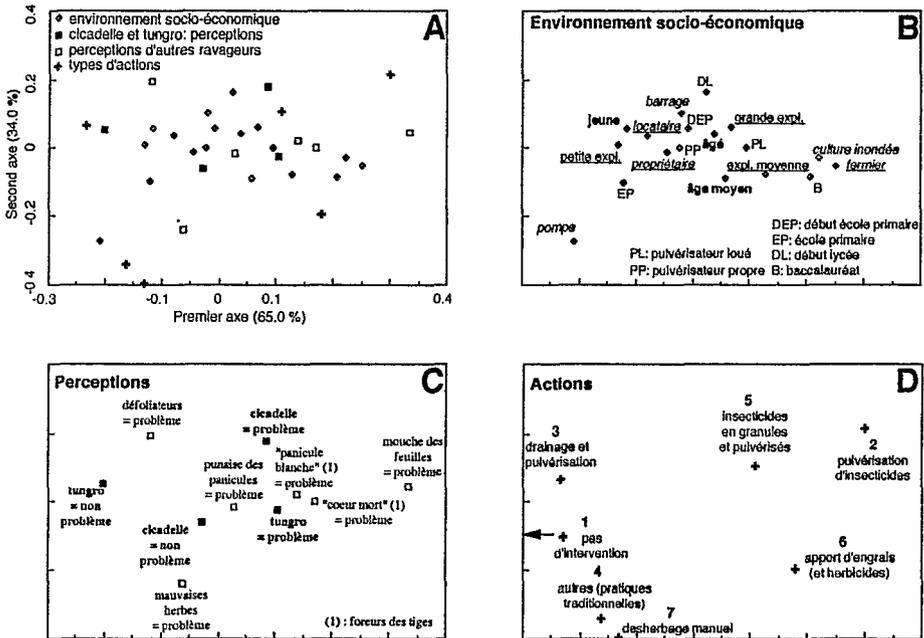


Figure 5

Analyse (A) des relations entre caractéristiques socio-économiques (B), perceptions (C) et actions destinées à contrôler les ravageurs du riz aux Philippines.

leurs cultures de riz, en relation avec leur profil socio-économique, exprimé en termes de taille des exploitations, de l'âge de l'agriculteur, de son niveau de formation, et d'accès à la terre. Il indique également le type d'action prise.

Le fait principal que révèle cette analyse est que les perceptions, puis les actions, très diverses, des agriculteurs vis-à-vis des problèmes phytosanitaires peuvent être associées aux profils socio-économiques, et au contexte technique des exploitations. Un autre élément est que la formation de base semble peu jouer dans l'élaboration des perceptions, et dans le processus de décision. De très nombreux canaux d'informations contribuent à l'établissement de perceptions (27); certains sont officiels (les conseillers agricoles), d'autres, informels. Ces derniers semblent souvent jouer un rôle prépondérant, et ce sont eux qui sont utilisés pour diffuser les concepts de lutte intégrée dans le programme inter-Etats de la FAO pour la lutte intégrée contre les ravageurs du riz (21), et qui ont assuré la vulgarisation du système de lutte EIPRE aux Pays-Bas.

Économie et protection des cultures

Un système de protection durable, doit, bien sûr, être également viable au plan économique. Conventionnellement, l'évaluation économique des méthodes de protection des cultures fait intervenir la valeur de la culture, la perte prévisible due aux ravageurs, et le coût des opérations de contrôle. Ces éléments sont, en principe, mesurables, et les calculs sont élémentaires (28). Les conséquences économiques d'une décision peuvent être évaluées à partir d'un tableau comportant quatre combinaisons possibles de recommandations et d'actions (tableau 3).

Tableau 3. Un canevas simplifié d'évaluation économique des actions visant au contrôle des ravageurs des cultures (d'après WAIBEL & ENGELHARDT, 1988, modifié).

Recommandation	Décision	
	Action (A)	Pas d'action (a)
Action recommandée (R)	AR = $Y - (p + S)$	aR = $Y - P$
Action non recommandée (r)	Ar = $Y - S$	ar = Y

Y : valeur économique de la culture;

S : coût individuel d'une action de contrôle;

P : perte financière évitée grâce cette intervention;

p : perte résiduelle inévitable.

Les lettres en caractères gras représentent les scénarios d'intervention (décision/recommandation). Les caractères en italiques représentent les composants du bénéfice escomptable dans chaque scénario.

Deux recommandations peuvent être envisagées : utiliser une méthode de contrôle (R), ou ne pas l'utiliser (r), sur la base d'un critère économique, par exemple un seuil d'action économique. L'action a un coût, S. L'agriculteur, de son côté, peut (A) ou non (a) suivre la recommandation d'agir. La perte financière liée à l'action du ravageur est P. Une méthode de contrôle, cependant, n'est généralement pas totalement efficace; p représente une perte résiduelle inévitable, même en cas d'action. Dans le calcul du bénéfice de l'agriculteur, les pertes dues aux ravageurs (P ou p), et le coût de l'action (S), sont déduits de la valeur de la culture, Y.

Ce canevas permet des calculs simples. Le scénario AR (action recommandée) est associé au revenu d'un agriculteur confronté à un problème phytosanitaire, et y répondant de manière adéquate. Le scénario ar (pas d'action et pas de recommandation d'agir) représente le revenu d'un agriculteur qui n'est pas confronté à un problème dont l'ampleur justifie une action. L'écart de bénéfice entre les deux scénarios ar et AR, $S + p$, constitue donc une mesure du gain qui pourrait être obtenu si une méthode de contrôle plus efficace (p plus petit) ou moins onéreuse (S plus faible) était élaborée.

La recherche de nouveaux produits pesticides met l'accent à la fois sur S (coût plus faible) et p (efficacité plus forte, de plus longue durée, donc nécessitant moins de traitements). La sélection de variétés résistantes met essentiellement l'accent sur S : l'utilisation d'une variété résistante est peu onéreuse, en particulier pour les plantes autogames. L'utilisation de variétés partiellement résistantes (l'efficacité est modérée, et p n'est pas négligeable) se justifie par le faible coût de la méthode de contrôle, et sa durabilité éventuelle - notamment s'il s'agit d'une résistance polygénique. Il s'agit là de l'une des raisons fondamentales pour lesquelles la recherche en protection des cultures dans les pays en développement a, depuis longtemps, mis l'accent sur l'amélioration de la résistance variétale aux ravageurs.

Ce type d'analyse ne porte pas sur les décisions de type stratégique, telles que le déploiement de gènes de résistance à un ravageur dans une zone de culture, ou la gestion des habitats des ennemis naturels des ravageurs. En principe, l'ensemble des coûts liés à la protection des cultures devraient être mesurables; en pratique, il n'en n'est rien encore.

Effets secondaires de l'utilisation des pesticides

Parce qu'ils ne font pas intervenir d'intrants extérieurs, les systèmes de production traditionnels sont souvent perçus, d'une manière un peu romantique, comme 'durables'. Ils ne le sont pas, parce qu'incapables de subvenir aux besoins démographiques. Dans les pays développés, et tout spécialement l'Europe, comme dans les pays en développement, le paradigme chimiothérapeutique qui régnait après la seconde guerre mondiale constituait le fondement d'une réponse à l'obsession des restrictions alimentaires (23) : les produits de l'industrie chimique allaient apporter des solutions rapides, générales, et, surtout, simples, aux problèmes de protection des cultures. La publication du Printemps Silencieux (29) marqua le premier signe d'une inquiétude.

Nombreuses sont les études qui ont abordé les effets de l'emploi de pesticides agricoles sur la santé et l'environnement (30; 31; 32; 33; 34). Ces études reconnaissent, unanimement, le profit tiré chaque année de l'emploi de pesticides; à l'échelle mondiale, il s'élève à plusieurs milliards de dollars. Elles indiquent aussi que des coûts sociaux, environnementaux, et de santé importants sont associés à leur utilisation. Aux Etats-Unis, ces coûts, associés notamment aux empoisonnements chez l'homme, chez les animaux domestiques, aux contaminations alimentaires, et à divers impacts sur l'environnement ont été estimés à 955 millions de dollars par an (33; tableau 4). Dans les pays en développement, les estimations sont rares, et très incomplètes (34). L'enquête effectuée par LOEVINSOHN (35) chez les agriculteurs philippins constitue une référence dans le domaine de l'impact des pesticides sur les populations rurales.

Tableau 4. Estimation des coûts environnementaux et sociaux associés à l'emploi des pesticides aux Etats-Unis (en millions de dollars par an; d'après PIMENTEL *et al.*, 1991).

Effets	Coûts
Intoxications chez l'homme	250
Intoxications d'animaux domestiques, et contamination des produits d'élevage	15
Destruction des ennemis naturels des ravageurs des cultures	150
Apparition de souches résistantes aux pesticides	150
Intoxication des abeilles et réduction des pollinisations	150
Pertes de récoltes et dommages occasionnés aux arbres	75
Diminution des pêches, du gibier, et de la faune naturelle	15
Réglementations gouvernementales concernant les pollutions par pesticides	150
Total	955

Une protection des cultures rationnelle pour une agriculture durable : les déterminants

La durabilité de l'agriculture constitue le cadre conceptuel d'une réponse au conflit entre une demande croissante et des ressources limitées et vulnérables. L'établissement de systèmes de protection des cultures viables devient, progressivement, le nouveau paradigme de la recherche en protection des cultures (22). Cette évolution ne peut se faire que dans le contexte, plus général, d'une agriculture durable, à laquelle la protection des cultures contribue. Trois grands groupes de facteurs dans cette évolution peuvent être envisagés (2) : l'élaboration de nouvelles technologies, les lois du marché, et les infrastructures de production.

Les nouvelles technologies

Trois domaines de recherche peuvent être envisagés quant à l'élaboration de systèmes viables de protection des cultures : (1) les systèmes de détection précoce; (2) les techniques de collecte et de traitement des données; et (3) les techniques de gestion des populations de ravageurs proprement dites.

De grands progrès sont attendus dans le domaine de la détection précoce des maladies des plantes. Les nouveaux outils permettent d'aborder l'analyse des épidémies à l'échelle moléculaire, comme par exemple dans le cas du mildiou de la pomme de terre (36). Les progrès effectués dans le domaine de l'analyse des dynamiques parasitaires sont étroitement liés à ceux de l'informatique. Ces travaux visent à la fois des objectifs fondamentaux, les mécanismes impliqués, mais aussi des objectifs appliqués, les tactiques (à l'échelle du champ, dans le cadre d'une saison) et les stratégies (à l'échelle régionale, dans le cadre des saisons à venir) de protection.

L'optimisation de la diversité génétique des cultures dans l'espace (22) afin de limiter les populations de ravageurs constitue un exemple de retour vers les stratégies utilisées dans les systèmes de production traditionnels. Des efforts considérables sont également effectués pour accroître l'efficacité des pesticides, et réduire leur impact sur les organismes non visés. Tandis que les pesticides de la première génération étaient appliqués en kilogrammes de produit actif à large spectre à l'hectare, les plus récents s'appliquent en grammes de produit par hectare, avec un spectre précis (23). Le rejet systématique de ces produits est injustifié; leur rôle futur doit être envisagé comme un renforcement d'autres instruments de contrôle, et comme dernier recours de situations désespérées.

Les lois du marché

Les lois du marché pourraient constituer l'arbitre impartial entre systèmes viables, ou non (37). Dans un certain nombre de circonstances, comme par exemple l'attitude d'une certaine fraction des consommateurs dans les pays développés en faveur de produits agricoles provenant de systèmes de production durables, ces mécanismes sont susceptibles d'avoir une certaine efficacité (2). Les lois du marché sont cependant souvent tronquées. Un exemple particulièrement clair est celui des subventions aux pesticides, qui sont, plus que tout autre facteur, l'obstacle principal à l'établissement de systèmes de protection des cultures durables. Dans le cas de la production de riz, ces subventions sont souvent masquées, parce qu'associées aux systèmes d'irrigation, ou aux mécanismes de prêts bancaires, qui incluent obligatoirement un volet « pesticide ». L'accès récent de certains pays au marché des pesticides, et l'établissement par certains gouvernements de priorités absolues à la production sont des sources de risques (34; 38).

Les infrastructures et les services

Au cours des années 1980, l'Indonésie, puis l'Inde, les Philippines, et d'autres pays asiatiques ont officiellement déclaré la lutte intégrée comme principe de base du contrôle des ravageurs du riz; récemment, cinquante spécialités commerciales, initialement subventionnées, ont été bannies du marché indonésien, parce que trop dangereuses, ou inutiles. Ces mesures, certainement, marquent la voie vers un progrès nécessaire. Leur mise en œuvre nécessite des conseillers, l'adhésion des communautés rurales, et une stratégie.

Un nouveau domaine de recherche : l'optimisation des systèmes de protection des cultures

En pratique, le fonctionnement d'un système de production agricole met en œuvre une série de processus au cours d'une période de temps donnée, avec un ensemble d'objectifs à atteindre dans le contexte d'un ensemble de contraintes - notamment les ressources de l'environnement. Chacun de ces processus nécessite des intrants, et produit un certain nombre de résultats. Par exemple, les processus concernant la protection des cultures mettent en œuvre des scénarios composés de conditions initiales, de méthodes de contrôle, et de facteurs d'environnement, qui se traduisent par une perte possible de rendement, une certaine qualité de la production, et une performance économique.

La technique de programmation linéaire interactive (39) a pour objectif d'explorer un domaine de faisabilité technique, compte tenu des contraintes imposées au système. Plusieurs objectifs sont envisagés successivement, et leur réalisation est optimisée. Ce domaine de faisabilité est ensuite progressivement restreint à un domaine optimal, défini en fonction de la valeur relative de chacun des objectifs envisagés. Naturellement, le résultat final est profondément affecté par les niveaux de priorité assignés aux objectifs, et ces pondérations varient considérablement d'un utilisateur à l'autre. En fonction des différents classements de priorités choisis, et des résultats qui leur sont, spécifiquement, associés, il est alors possible de comparer différents scénarios de développement.

Cette approche a par exemple été suivie pour optimiser le revenu et la production de maïs tout en minimisant les infiltrations de nitrates en couplant un modèle de simulation déterministe de croissance de la culture à un algorithme d'optimisation (40). Une approche analogue a été suivie dans le cas plus complexe où un ensemble de productions d'un agroécosystème (pêche, élevage, production céréalière et maraîchère) ont simultanément été prises en considération, afin de délimiter un scénario de développement optimal pour l'une des régions du Mali (41).

Le concept d'agriculture durable implique la définition de nouveaux critères d'évaluation des composants des agroécosystèmes (1). Une classification des sols fondée sur la notion de « fertilité » ne suffit plus; il est par exemple nécessaire de prendre en

considération la résistance des sols à l'érosion, en fonction des couverts végétaux et des itinéraires techniques. De la même manière, l'évaluation des techniques de protection des cultures en fonction de leur coût et de leur efficacité devient insuffisante; il faut envisager la viabilité de ces techniques (durabilité de la résistance aux ravageurs, impact sur les organismes non visés, par exemple), et les conditions dans lesquelles elles sont mises en œuvre (tableau 2). Ces thèmes sont particulièrement importants dans la recherche en protection des cultures d'aujourd'hui, et pourront, notamment, donner naissance aux critères de contraintes nécessaires pour une approche d'optimisation linéaire. Ce type de démarche représente un champ nouveau de recherche en protection des cultures pour l'élaboration de systèmes de protection contre les ravageurs, dans le contexte d'une agriculture durable.

Références

- (1) WILKEN G.C., 1991. *Sustainable agriculture is the solution, but what is the problem?* BIFADEC Occasional Paper 14, 32 p.
- (2) MEADOWS D.H., MEADOWS D.L. & RANDERS J., 1992. *Beyond The Limits. Global Collapse, Or A Sustainable Future*. Earthscan, London, 300 p.
- (3) TENG P.S., SAVARY S. & REVILLA I., 1993. *Systems of plant protection*. In: World food production by means of sustainable agriculture: the role of crop protection. Ciba Foundation Symposium 177. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 116-139.
- (4) SHANE W.W. & P.S. TENG. 1992. Impact of *Cercospora* leaf spot on root weight, sugar yield and purity of *Beta vulgaris*. *Plant Disease* 76: 812-820.
- (5) SHANE W.W., P.S. TENG A. LAMEY, & A. CATTANACH. 1985. Management of *Cercospora* leafspot of sugarbeets: Decision aids. *North Dakota Farm Research* 43: 3-5.
- (6) THUY NGUYEN NGOC, & THIEU DUONG VAN. 1992. *Status of integrated pest management programme in Vietnam*. In *Integrated Pest Management in the Asia-Pacific Region* (ed. P.A.C. Ooi *et al.*), pp. 237-250. CAB International/ Asian Development Bank.
- (7) RABBINGE R., WARD S.A. & VAN LAAR H.H. (Eds), 1989. *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Pudoc, Wageningen. 420 p.
- (8) ZADOKS J.C., 1981. *Crop loss today, profit tomorrow: an approach to quantifying production constraints and to measuring progress*. In: *Crop Loss Assessment Methods*. Suppl. 3. Chiarappa, E., Ed. CAB/FAO, Farnham. pp. 5-11.
- (9) ZADOKS J.C & SCHEIN R.D., 1979. *Epidemiology and Plant Disease Management*. Oxford University Press, New York. 427 p.
- (10) DE JONG M.D., SCHEEPENS P.C. & ZADOKS J.C., 1990. Risk analysis for biological control: a Dutch case-study in biocontrol of *Prunus serotinia* by the fungus *Chondrostereum purpureum*. *Plant Disease* 74: 189-194.

- (11) SAVARY S. & ZADOKS J.C., 1991. *Etude du dommage : méthodologies*. In : *Approches de la pathologie des cultures tropicales - L'Exemple de l'arachide en Côte-d'Ivoire*. (S. SAVARY, Ed.). Karthala-ORSTOM, Paris, pp. 255-280.
- (12) BUSNARDO J.P., 1986. *Projet de recherche sur la culture de l'arachide en Côte-d'Ivoire*. Institut des Savanes/IRAT-CIRAD. DSP n° 3, Montpellier, 83 p.
- (13) SAVARY S. & BRISSOT F., 1990. *Epidemiology of foliar diseases and crop losses in groundnut in West Africa*. *Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent* 55 (2a) 253-261.
- (14) GLASS E.H. & THURSTON H.D., 1978. Traditional and modern crop protection in perspective. *BioScience* 28: 109-115.
- (15) REDDY A.P.K., KATYAL J.-C., ROUSE D.I. & MACKENZIE D.R., 1979. Relationship between nitrogen fertilization, bacterial leaf blight severity, and yield of rice. *Phytopathology* 69: 970-973.
- (16) COOK R.J. & VESETH R.J., 1991. *Wheat Health Management*. American Phytopathological Society. St. Paul, 152 p.
- (17) DAAMEN R.A., WIJNANDS F.G. & VAN DER VLIET G., 1989. Epidemics of diseases and pests of winter wheat at different levels of agrochemical inputs. A study on the possibilities for designing an integrated cropping system. *Journal of Phytopathology* 125: 305-319.
- (18) OU S.H., 1985. *Rice Diseases*. CAB International Mycological Institute. Farnham Royal, Slough. 370 p.
- (19) ZADOKS J.C., 1974. The role of epidemiology in modern plant pathology. *Phytopathology* 64: 918-923.
- (20) SÉBILLOTE M., 1990. A quoi sert la recherche en agronomie? Entretien. *La Recherche*. Supplément n° 227 : 6-9.
- (21) KENMORE P.E., 1993. *Integrated pest and disease management in rice: a case study*. In: *World food production by means of sustainable agriculture: the role of crop protection*. Ciba Foundation Symposium 177. John Wiley & Sons, Ltd, sous presse.
- (38) TENG P.S. & K.L. HEONG (Eds.) 1988. *Pesticide Management and Integrated Pest Management in Southeast Asia*. Consortium for International Crop Protection, College Park, USA
- (22) MUNDT C.C. & BROPHY L.S., 1988. Influence of number of host genotype units on the effectiveness of host mixture for disease control: a modeling approach. *Phytopathology* 78:1087-1094.
- (23) ZADOKS J.C., 1991. A hundred and more years of plant protection in the Netherlands. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 97: 3-24.

- (24) KENMORE P.E., LITSINGER J.A., BANDONG J.P., SANTIAGO A.C. & SALAC M.M., 1987. *Philippine rice farmers and insecticides: thirty years of growing dependency and new options for change*. In: Management of pests and pesticides: farmers' perceptions and practices. Tait, J. & Napompeth, B. (Eds.). Westview Press, Boulder, Colorado. pp. 98-108.
- (25) Committee on Genetic Vulnerability of Major Crops. *Genetic Vulnerability of Major Crops*. Washington, D.C. National Academy of Science. 307 p.
- (26) SAVARY S., 1993. Rice farmers' background, perception of pests, and pest management actions: a case study in the Philippines. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 99 (suppl. 3): 181-190.
- (27) ZADOKS J.C., 1981. EPIPPE: a disease and pest management system for winter wheat developed in the Netherlands. *EPPO Bull.* 11 (3) : 365-369.
- (28) WAIBEL H. & ENGELHARDT T., 1988. Criteria for the economic evaluation of alternative pest management strategies in developing countries. *FAO Plant Protection Bulletin* 36: 27-33.
- (29) CARSON 1962. *Le printemps silencieux* (Silent Spring). Fawcett World Library, Crest Book. New York. 304 p.
- (30) PIMENTEL D. 1983. *Environmental aspects of pest management*. In: Chemistry and world food supply: the new frontiers, Chemrawn II. Oxford pp. 185-201.
- (31) PIMENTEL D. & ANDOW D.A., 1984. Pest management and pesticide impacts. *Insect Sci. Applic.* 5: 141-149.
- (32) PIMENTEL D., McLAUGHLIN L., ZEPP A., LATIKAN B., KRANZ J., KLEINMAN P., VANCINI J., ROACH W.J., GRAAP E., KEETON W.S. & SELIG G., 1991. *Environmental and economic impacts of reducing US agricultural pesticide use*. In: CRC handbook of pest management in agriculture, 2nd Edition, vol. I. CRC Press, Boca Raton. pp. 679-718.
- (33) CONWAY G. & PRETTY J.N., 1991. *Unwelcome Harvest. Agriculture and Pollution*. Earthscan, London, 645 p.
- (34) BOUGUERRA M.L., 1990. Les pesticides et le Tiers Monde. *La Recherche* 17 : 543-553.
- (35) LOEVINSOHN M.E., 1987. Insecticide use and increased mortality in rural central Luzon, Philippines. *The Lancet* 1: 1359-1362.
- (36) FRY W.E., GOODWIN S.B., MATUSZAK J.M., SPIELMAN L.J. & MILGROOM M.G., 1992. Population genetics and intercontinental migrations of *Phytophthora infestans*. *Annual Review of Phytopathology* 30: 107-129.
- (37) UPTON M., 1993. *The economics of food production*. In: World food production by means of sustainable agriculture: the role of crop protection. Ciba Foundation Symposium 177. John Wiley & Sons, Ltd, 253-268.

- (38) DE WIT C.T., VAN KEULEN H., SELIGMAN N.G. & SPHARIM I., 1980. Application of interactive multiple goal programming techniques for analysis and planning of regional agricultural development. *Agricultural Systems* 26: 211-230
- (40) ALOCILIA E.C. & RICHIE J.T., 1993. *Multicriteria optimization for a sustainable agriculture*. In: *Systems Approaches for Agricultural Development*. F.W.T. Penning de Vries *et al.* (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Amsterdam. pp. 381-396.
- (41) VAN KEULEN H., 1993. *Options for agricultural development: a case study for Mali's Fifth Region*. In: *Systems Approaches for Agricultural Development*. F.W.T. Penning de Vries *et al.* (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Amsterdam. pp. 367-380.