

Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides, une synthèse critique de la littérature

Alain Carpentier

▶ **To cite this version:**

Alain Carpentier. Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides, une synthèse critique de la littérature. La réduction des pesticides agricoles enjeux, modalités et conséquences, Mar 2010, Lyon, France. 41 p. hal-02821066

HAL Id: hal-02821066
https://hal.inrae.fr/hal-02821066

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

La réduction des pesticides agricoles enjeux, modalités et conséquences ; 2010/03/11-12 ; Lyon (FRA)
SFER - CEMAGREF

Economie de la production agricole et régulation de l'utilisation des pesticides
Une synthèse critique de la littérature

A. Carpentier
INRA-UMR Smart et ENSAI, Rennes

Février 2010

1. Introduction

Cette contribution vise à présenter, analyser et critiquer les apports des travaux des économistes pour la définition et la mise en œuvre des politiques de régulation des pesticides. Elle s'appuie sur une analyse critique de la littérature et s'inscrit dans la suite de l'expertise scientifique menée par Carpentier *et al.* (2005). Cette contribution propose de fait des réponses à deux grandes questions.
1. Quels sont les apports des économistes pour la compréhension de l'utilisation des pesticides et pour la régulation de cette utilisation ? Les réponses proposées ici s'organisent en deux points. Le premier est une brève revue de la littérature économique, essentiellement, néo-classique qui vise à dresser un bilan des résultats publiés. Elle utilise essentiellement les références et l'analyse de Carpentier *et al.* (2005) mais est complétée par quelques références, publiées depuis 2006 pour la plupart. Le second est plus original puisqu'il vise à présenter les apports de la science économique à travers la définition des grands traits d'une politique de régulation efficace des pesticides.
2. Quelles sont les principales lacunes des travaux des économistes dans les domaines de l'utilisation et de la régulation des pesticides ?
Les réponses apportées à cette question découlent directement de celles apportées à la première question. Ces réponses peuvent être interprétées comme un recensement des recherches et études à mener par les économistes, et pas seulement des chercheurs, pour mieux renseigner les décideurs publics en charge de la régulation des pesticides.

Cette contribution vise surtout à explorer l'interface entre la communauté des économistes (essentiellement néo-classiques) et les utilisateurs potentiels de leurs analyses et résultats. Elle vise à mettre en évidence les apports et lacunes des travaux des économistes concernant l'éclairage du débat public sur la question des pesticides. La principale thèse de cette contribution est que les apports sont non négligeables, même s'ils sont parfois mal exposés, mais que les lacunes le sont tout autant. Ces lacunes tiennent à la pratique de la recherche en économie agricole, qui tend à se focaliser sur des aspects spécifiques de l'utilisation ou de la régulation des pesticides dont l'analyse peut donner à des articles relativement courts, mais également aux limites mêmes du corpus théorique mobilisé et des données disponibles.

Cette contribution s'articule autour de l'analyse de la régulation de l'utilisation des pesticides telle qu'elle est pratiquée par les économistes néo-classiques, ce qui permet de passer en revue les principaux thèmes abordés pour la définition d'une « politique pesticides ». Les thèmes analysés ici ont été choisis afin de clarifier les points les plus polémiques ou confus des débats soulevés par le choix d'une politique pesticides.

La conclusion est construite comme une synthèse des apports de la science économique pour la définition d'une politique de régulation de l'utilisation des pesticides. Elle prend pour exemple la politique danoise, dont l'architecture générale est très pragmatique du point de vue d'un économiste.

2. Objectifs et moyens d'une politique de régulation des pesticides

Peu d'articles scientifiques abordent la question de la mise en place d'une politique de régulation de l'utilisation des pesticides à grande échelle, *i.e.* celle d'un pays ou d'un groupe de pays, les travaux de Zilberman et Millock (1997) et de Lichtenberg (2004) étant des exceptions dans ce contexte.
Quelques rapports d'expertise commandés par les décideurs publics ont discuté ce point à partir d'analyses économiques (Oskam *et al.* 1997 ; Carpentier *et al.*, 2005) ou d'analyses essentiellement comptables (BiPRO, 2004) ou d'approches mixtes (Bichel *et al.*, 1998 ; Butault *et al.* 2009).

2.1. Effets externes et optimum de pollution

L'utilisation des pesticides est à l'origine de deux grands types d'effets externes, selon l'impact de ces effets sur l'homme. Tout d'abord, la présence de ces produits (ou de leurs résidus de dégradation) dans les aliments, l'eau ou l'air peut nuire à la santé humaine. Ensuite, la présence de ces produits dans l'environnement naturel peut affecter les faunes et flores.
La multiplicité des vecteurs des pesticides et des résidus de leur dégradation fait qu'il est généralement impossible d'identifier la « source » de leur émission dans l'environnement, sauf cas exceptionnels de pollutions ponctuelles. La pollution par les pesticides est donc une pollution diffuse.

Les pesticides sont utilisés par les agriculteurs pour protéger leurs cultures contre des déprédateurs ou des maladies et pour éliminer les adventices qui peuvent nuire au développement et à la croissance des plantes cultivées. De ce fait, les pesticides accroissent la production agricole et, par là-même, participent à l'offre de produits agricoles en quantités importantes et en qualité satisfaisante à des prix relativement modestes.
Mais les effets externes des pesticides sur l'environnement ou sur la santé humaine appellent une régulation de la part de l'Etat dans la mesure où une absence de régulation conduit à une utilisation excessive de pesticides, ou tout au moins une production excessive d'effets externes négatifs. La situation actuelle tend à négliger les effets externes des pesticides mais il apparaît également évident qu'une suppression pure et simple de la lutte chimique contre les ennemis et les concurrents des plantes cultivées n'est pas une solution acceptable. Il doit donc exister un compromis entre l'utilisation actuelle et la non-utilisation des pesticides.

Une réduction de l'utilisation des pesticides, quelle que soit la manière dont elle est mise œuvre, aura donc deux types d'effets « directs » :

- d'une part elle réduira le revenu des producteurs agricoles et des firmes dont l'activité dépend du commerce des produits phytosanitaire,
- d'autre part elle accroîtra la qualité de l'environnement naturel et réduira les risques pesant sur la santé humaine. Ces effets peuvent avoir une incidence économique directe comme la réduction des dépenses de dépollution ou des dépenses de santé, mais dans la plupart des cas ces effets demeurent difficiles à évaluer directement.

A ces effets directs s'ajoutent des effets indirects liés au rééquilibrage des marchés, notamment des produits agricoles. La réduction de l'utilisation des pesticides tend à réduire l'offre agricole et, par là-même, tend à accroître le prix des produits agricoles et donc des produits alimentaires.

Les économistes définissent l'optimum d'utilisation des pesticides comme la quantité de pesticides qui égalise leurs bénéfices marginaux et leurs dommages marginaux, dans une logique d'analyse coûts-bénéfices. Une politique de régulation de l'utilisation des pesticides doit alors permettre la mise en œuvre de cet optimum au moindre coût pour la société. La définition de cet optimum soulève plusieurs questions. Tout d'abord les coûts de la réduction de l'utilisation des pesticides sont aisément identifiables et peuvent être évalués, tout au moins approximativement. En revanche, la plupart des bénéfices de cette réduction sont difficiles à évaluer : la plupart d'entre eux concerne une réduction de risque et/ou concerne des activités non marchandes. Aussi, les « perdants » de la réduction des pesticides sont bien identifiés : agriculteurs et, producteurs et distributeurs de produits phytosanitaires ; et, à un degré moindre, les consommateurs (au sens large) des produits agricoles. Les « gagnants » de cette politique forment un groupe d'agents beaucoup plus diffus, que nous regrouperons sous le vocable de « citoyens » pour simplifier.

Du point de vue de la théorie économique, cette asymétrie entre la concentration des pertes et le caractère diffus des bénéfices explique en partie l'absence de solution Coasienne, *i.e.* négociée, au problème des pesticides et justifie l'intervention des pouvoirs publics. Une autre raison souvent invoquée quant à l'absence de solution Coasienne tient à l'absence d'attribution de droits de propriété clairement établis pour ce qui concerne l'espace, ou tout au moins certaines parties. Laisser les pollueurs agir à leur guise revient implicitement à leur attribuer les droits de propriété de l'environnement. Si l'environnement est défini comme un espace public appartenant à tous, les pouvoirs publics doivent intervenir dans l'intérêt de l'ensemble des citoyens, « pollués » mais également « pollueurs ». On revient ici à la notion d'optimum social.[1]
De même, l'organisation de la filière « agriculture biologique » est, au moins partiellement, motivée par des objectifs de réduction de pollution par les pesticides. Cependant, l'organisation de ces marchés n'offre qu'une solution partielle au problème posé. De fait, les primes de prix (différences entre le prix des produits issus de l'agriculture biologique et celui des produits conventionnels équivalents) peuvent, en partie, être analysés comme des contributions volontaires, ou des subventions privées, au fonctionnement et au développement d'un secteur de production respectueux de l'environnement (Carpentier *et al.*, 2002 ; Kotchen, 2005). Or il est bien connu depuis les travaux de Samuelson que ce mode de financement d'un bien public (la protection de l'environnement) est généralement sous-optimal dans le sens où, dans le contexte considéré, il ne permet pas de réduire suffisamment les pollutions par les pesticides. Le rôle de coordination des pouvoirs publics s'avère nécessaire pour mettre en œuvre une solution optimale.

L'optimum économique d'utilisation des pesticides est défini en référence aux propriétés d'allocation optimale des ressources des marchés en concurrence pure et parfaite (premier Théorème du bien-être). Par construction cet optimum est défini à partir de considérations relatives à l'efficacité économique, *i.e.* de la maximisation de la somme des surplus des consommateurs et producteurs, mais néglige les questions liées à la répartition à la charge de la réduction de l'utilisation des pesticides.
D'un point de vue théorique, l'optimum d'utilisation des pesticides satisfait les conditions d'optimalité du critère de Kaldor-Hicks : lors du passage à l'optimum d'utilisation des pesticides la somme des bénéfices est supérieure à la somme des pertes liées à la réduction de cette utilisation. Il est donc en théorie possible de prélever une partie des bénéfices auprès des « gagnants » pour la reverser au profit des « perdants » sans modifier le caractère optimal de l'utilisation des pesticides (second Théorème du bien-être), et par conséquent de garantir une amélioration du fonctionnement de l'économie au sens de Pareto. Or les bénéfices de la réduction de l'utilisation des pesticides ne sont pas tangibles contrairement aux pertes qu'elle génère, la redistribution envisagée est donc clairement impossible, sauf à puiser dans le budget de l'Etat, *i.e.* l'ensemble des ressources fournies à l'Etat par les « citoyens ».
Cependant, et c'est là un point essentiel, il convient de distinguer les questions évoquées ici : l'efficacité économique est un critère de choix qui doit conduire à réduire l'utilisation des pesticides alors que la « justice » est un critère de choix politique qui peut conduire à répartir la charge de cette réduction sur différents (types d') agents, en particulier en compensant, au moins partiellement, les pertes des « perdants » de la réduction. En théorie ces critères sont distincts, mais ils tendent à être confondus dans le débat public, voire dans la décision publique. Il convient à ce propos de rappeler que le « principe pollueur payeur » n'est pas un principe d'efficacité économique mais un principe politique. Payer les pollueurs pour qu'ils réduisent leurs niveaux de pollution peut être économiquement efficace sous certaines conditions.

Les bénéfices de la réduction de l'utilisation des pesticides sont en général très difficiles à « monétariser ». Ils sont donc difficiles à comparer avec les pertes associées à cette réduction, notamment dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices « standard ». Ces bénéfices concernent souvent des réductions de risques (sur la santé humaine ou la qualité de l'environnement naturel) et

[1] Ce constat à l'échelle générale n'exclut pas une résolution spontanée, à une échelle locale ou partielle. L'exemple du plateau de Vittel demeure cependant une exception dans ce contexte, même si certaines collectivités locales (*e.g.* la commune de Pontivy) ont adopté la solution choisie par la société Vittel.

des services non marchands de l'environnement. Les économistes peuvent fournir des indications plus ou moins précises quant à l'évaluation monétaire de certains de ces risques et de ces services, voir fournir des ordres de grandeur globaux. Mais l'information fournie demeure partielle et ne peut être exempte de choix plus ou moins discutables, notamment pour ce qui concerne les critères d'évaluation des risques ou encore la prise en compte des générations futures, leurs besoins et leurs préférences. Ceci implique que la notion d'optimum économique d'utilisation des pesticides est un concept théorique dont l'identification pratique est très difficile. Il n'en reste pas moins que cet optimum doit demeurer une référence pour définir une politique de réduction de l'utilisation des pesticides, ne serait-ce que pour garder à l'esprit que l'objectif de réduction doit faire l'objet d'un arbitrage entre des « pertes » et des « bénéfices » (Arrow *et al.*, 1996).
Il convient à ce propos de rappeler les liens qui existent entre l'analyse coûts-bénéfices et les analyses multicritères ou encore l'analyse du cycle de vie. Calculer les coûts et les bénéfices associés à une politique de régulation de l'utilisation des pesticides vise essentiellement à mesurer les effets des pesticides dans une unité commune : l'unité monétaire. Dans l'analyse coûts-bénéfices les « poids » donnés à chacun des effets des pesticides est celui qui lui est donné implicitement par son importance dans l'économie et par l'importance que lui donne les citoyens. Ces poids sont donc relatifs à la situation actuelle, dite *statu quo*, et à un critère d'efficacité économique. Les coûts et les bénéfices sont ceux associés à des modifications de la situation actuelle, certains secteurs de l'économie produisant plus de richesses et d'autres moins, certains individus bénéficiant plus de la nouvelle situation que d'autres.
Ce choix n'est pas neutre mais il ne l'est pas moins que les pondérations plus ou moins implicites utilisées dans les analyses multicritères : additionner des choux et des carottes suppose toujours de définir les valeurs relatives des choux et des carottes, que ces valeurs soient choisies sur des critères économiques, nutritifs ou autres. De ce point de vue, ne recenser que les coûts et les bénéfices et laisser les décideurs politiques choisir les objectifs de la politique, à l'instar des préconisations de Arrow *et al.* (1996), permet de laisser le choix des pondérations aux individus qui ont justement été élus mener de tels arbitrages.
De fait, il n'existe pas de solution « clé en mains » pour la régulation des pesticides puisque les experts ne peuvent se substituer aux décideurs publics pour certains arbitrages, même s'ils peuvent contribuer à les éclairer.

2.2. Distinguer les objectifs et les moyens de la régulation

Puisque la régulation de l'utilisation des pesticides est susceptible de modifier un large ensemble de choix économiques, les objectifs de l'intervention publique ne doivent pas porter sur la seule utilisation des pesticides. Ce point renvoie à la notion « d'acceptabilité » politique qui bien que relativement vague revient souvent dans le débat public, notamment sur les questions de mise œuvre des politiques envisagées.

L'idée défendue par la plupart des économistes est que si les objectifs d'une politique de réduction de l'utilisation des pesticides doivent être débattus, les moyens (et donc l'ensemble des mesures composant la politique) mis en œuvre pour atteindre ces objectifs doivent être choisis de manière rationnelle afin de minimiser les dépenses publiques. La minimisation des dépenses publiques repose sur un argument d'efficacité économique de l'intervention publique : tout gaspillage du budget de l'Etat se fait au détriment d'autres objectifs des pouvoirs publics, tels que la lutte contre le chômage, l'éducation ou encore la défense.
La distinction entre objectifs à atteindre et les moyens mobilisés pour les atteindre revêt un caractère essentiel dans la suite. Si les objectifs de politiques doivent être acceptables socialement (et, bien entendu, réalistes), les moyens à mettre à mettre en œuvre doivent être optimisés, « sans états d'âme » serait-on tenté d'ajouter.

Le revenu des agriculteurs (et par voie de conséquence l'emploi agricole) est un point d'achoppement de toute discussion concernant la régulation des pollutions d'origine agricole. Le parti pris ici est que le maintien du revenu des agriculteurs à un certain niveau doit être considéré comme un objectif politique clairement énoncé, fruit d'un compromis jugé acceptable par l'ensemble de la société. Il

n'est pas question ici de définir le niveau de référence à maintenir mais de considérer que ce niveau fait partie de l'ensemble des objectifs à atteindre.
Dans le cas de la régulation des pesticides, ce point s'avère crucial. En effet, la taxation des pesticides est considérée par les économistes comme un instrument de politique efficace pour la réduction de l'utilisation des pesticides parce qu'elle génère une incitation économique à la réduction de cette utilisation.[2] Or il est souvent avancé qu'une taxation importante des pesticides est une politique socialement « inacceptable ». Il ne serait donc possible de mettre en place qu'une taxe modérée des pesticides. Cependant, une taxation importante des pesticides n'est en fait « inacceptable » que parce qu'elle remet en cause un objectif souvent implicite mais très important dans des débats publics : le maintien du revenu agricole.

Expliciter clairement cet objectif permet de mettre en évidence que la politique de régulation de l'utilisation des pesticides a en fait (au minimum) deux objectifs : réduire les effets négatifs des pesticides mais également maintenir le revenu des agriculteurs. Or, la célèbre maxime de Tinbergen (1952) « un instrument par objectif », qui résulte simplement d'un résultat classique dans le domaine de l'optimisation sous contrainte[3], indique que dans ce cas il convient d'utiliser (au moins) deux instruments. Dès lors, la théorie économique implique qu'il convient d'utiliser d'une part une taxation importante des pesticides pour atteindre l'objectif de réduction des pollutions, et d'autre part des transferts forfaitaires directs vers le revenu des agriculteurs pour compenser, au moins partiellement, la perte liée à la taxation. Là encore, l'analyse économique tend à montrer que le transfert forfaitaire est l'instrument le plus efficace pour opérer des compensations de revenu. De fait, se limiter à un seul instrument, *i.e.* choisir une « petite » taxe, préserve le revenu agricole mais ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction des pollutions.

Expliciter l'ensemble des objectifs fixés permet de clarifier le débat sur le choix des mesures à choisir pour atteindre ces objectifs. Cet exemple permet par ailleurs de mettre en évidence un autre aspect important de la régulation de l'utilisation des pesticides : une politique efficace et « socialement acceptable », *i.e.* visant à atteindre simultanément un ensemble d'objectifs choisis par la société, de régulation de l'utilisation des pesticides est nécessairement composée d'un ensemble de mesures complémentaires entre elles pour atteindre les différents objectifs décidés.

3. Dimension temporelle de la régulation des pesticides

Il est bien entendu évident que les objectifs choisis doivent être compatibles entre eux pour pouvoir être atteints simultanément. Or il apparaît évident qu'une réduction drastique de l'utilisation des pesticides n'est actuellement pas compatible, par exemple, avec le maintien des niveaux d'offre des produits agricoles. Ceci dit, des objectifs peuvent être incompatibles à court terme mais être compatibles à long terme. Cette affirmation repose sur deux types d'arguments.

Tout d'abord, les marges de manœuvre des agriculteurs pour réduire leurs utilisations de pesticides sont plus importantes à long terme qu'à court terme. A court terme, les agriculteurs subissent les effets des mesures de régulation contraignantes. A moyen terme ils peuvent adapter leurs niveaux d'utilisation de pesticides, directement ou en modifiant leurs assolements. A moyen terme et long terme ils peuvent également changer de pratiques culturales vers des pratiques culturales plus économes en pesticides lorsque de telles pratiques sont disponibles. Les effets de ces marges de manœuvre sont résumés dans la notion d'élasticité prix (propres) de l'utilisation des pesticides des agriculteurs, l'élasticité étant plus importante (en valeur absolue) à long terme qu'à court terme

[2] De manière générale, il existe un consensus assez large concernant le rôle fondamental des incitations économiques pour la régulation des pollutions au sein de la population des économistes, tout au moins les économistes néo-classiques (Zilberman and Millock, 1997 ; Lichtenberg, 2004 ; Stavins, 2003).
[3] Schématiquement, ce principe indique que lorsqu'on cherche un maximum, l'optimum atteint avec un vaste ensemble de solutions potentielles est généralement supérieur à l'optimum atteint avec un ensemble plus restreint de solutions potentielles. Dit autrement, se fixer des contraintes sur l'ensemble des solutions disponibles tend à réduire le niveau du maximum accessible.

conformément au principe de Le Châtelier-Samuelson. Ici la valeur absolue de l'élasticité reflète l'étendue des solutions à la disposition des agriculteurs, à la condition que ces solutions soient économiquement rentables.

De manière générale, la mise en place de mesures contraignantes sur l'utilisation des pesticides accroît la demande des agriculteurs pour des alternatives à l'utilisation des pesticides. Or, et c'est là le second argument avancé en faveur d'objectifs de plus en plus compatibles à long terme, cette demande des agriculteurs peut être à l'origine d'innovations induites (Hayami et Ruttan, 1985 et 1998). Ces innovations peuvent être technologiques, *e.g.* de nouvelles pratiques de production, de nouveaux systèmes de production, … voire de nouvelles productions. Mais ces innovations peuvent également être institutionnelles. Il est par exemple aisé de montrer qu'un accroissement du prix des pesticides peut être à l'origine d'un marché du conseil visant à minimiser le recours à ces intrants devenus très onéreux. Sur un plan différent, des mesures de sensibilisation des consommateurs peuvent stimuler la demande de produits agricoles issus de techniques de production « agri-biologiques » ou « sans pesticides ».

Il convient néanmoins de noter ici que si les mécanismes des innovations induites ont pu être mis en évidence dans différents contextes, déterminer les innovations résultant de ces mécanismes dans le cadre d'une politique de long terme de régulation des pesticides demeure, dans une large mesure, du domaine de la prospective. En particulier, de nombreux facteurs « exogènes » vis-à-vis de la problématique pesticides, voire de l'agriculture, peuvent produire des incitations contrecarrant les schémas d'incitation de la politique choisie, la récente flambée du prix des matières premières agricoles n'étant qu'un exemple parmi d'autres.

Il est donc nécessaire d'adapter l'horizon temporel aux objectifs fixés et de stimuler les mécanismes d'innovations induites en mettant en place des incitations appropriées. Par exemple, des objectifs ambitieux de réduction de l'utilisation des pesticides associés avec, *e.g.* des objectifs de maintien des niveaux d'offre agricole, ne peuvent être atteints qu'à moyen voire long terme.
Considérer la dimension temporelle de la régulation des pollutions apparaît d'autant plus essentiel qu'il est courant de se fixer des objectifs de réduction des pollutions ambitieux à court terme et de finir par conclure qu'il est impossible d'atteindre ces niveaux de réduction sans mettre en péril la pérennité du secteur de production pollueur.
En outre, favoriser les logiques d'anticipation en annonçant l'évolution de la politique envisagée permet de limiter les coûts directs de la régulation pour les agents qui la subissent.

4. Dimensions spatiale et sectorielle de la régulation des pesticides

Jusqu'à présent il a été fait référence à « un optimum ». Or cet optimum est multiple dans la mesure où il doit tenir compte de l'extrême hétérogénéité des effets des pesticides sur la santé humaine et la qualité de l'environnement naturel d'une part, et sur la production agricole d'autre part (Lichtenberg et Zilberman, 1986a). Pour ce qui concerne la régulation de l'utilisation des pesticides par l'agriculture professionnelle, il conviendrait en théorie de définir l'optimum localement, *i.e.* au niveau d'une unité géographique homogène du point de vue de la production agricole, afin de cibler la politique sur les effets des pesticides utilisés pour la protection des productions concernées (en matière de santé humaine) et homogène du point de vue des conflits d'usage de l'espace, afin de cibler certaines atteintes à l'environnement naturel (zones sensibles d'un point de vue écologique et/ou cours d'eau) ou à la santé humaine (zones de captage d'eau potable et/ou zones d'habitation). Bien entendu, s'il est souhaitable d'ajuster au mieux la politique au niveau local, cet ajustement peut être très coûteux pour le budget de l'Etat. La définition concrète de cet « optimum multiple » est clairement irréaliste mais doit néanmoins servir de référence pour la définition des objectifs de la politique de régulation.

La gestion de l'hétérogénéité des situations rencontrées quant à l'utilisation des pesticides requiert également un examen particulier. Cette hétérogénéité se retrouve dans la définition des *optima* locaux évoqués ci-dessus. En théorie, cette multiplicité des situations appelle autant de solutions si on souhaite mettre en place des solutions de premier rang au sens de Pareto, tout au moins si on néglige

les coûts d'administration des mesures à mettre en place. Or ces coûts peuvent être très importants et impliquent un arbitrage avec le « ciblage » local des mesures à mettre en œuvre, *i.e.* la pertinence au cas par cas des mesures.
L'hétérogénéité des situations à considérer provient tout d'abord de la sensibilité des sites considérés vis-à-vis des transferts et des effets des pesticides et de leurs résidus. Les sites de production agricole à proximité de cours d'eau, de points de captage d'eau potable, de zones habitées ou encore de zones écologiquement sensibles sont susceptibles de générer des conflits d'usage nécessitant une réduction importante des utilisations de pesticides.
Les différents pesticides et les produits de leur dégradation sont eux-mêmes à l'origine d'effets toxicologiques et éco-toxicologiques hétérogènes.
Les différentes productions agricoles sont elles-mêmes plus ou moins « dépendantes », ce terme étant défini plus bas, de la protection phytosanitaire chimique. En particulier, les fruits (vigne incluse) et légumes sont des produits très sensibles aux maladies et déprédateurs, d'un point de vue quantitatif mais, et peut-être surtout, d'un point de vue qualitatif.

En outre, la production agricole est souvent organisée en bassins de production géographiquement concentrés dans les zones favorables d'un point de vue pédo-climatique. Ces bassins de production peuvent également être la conséquence d'un enchaînement d'évènements historiques ou celle d'effets d'agglomération liés à des externalités technologiques (*e.g.*, formation de la main d'œuvre) ou à la proximité de sites de consommation ou de transformation de ces produits. Cette concentration peut être à l'origine de pollutions par les pesticides relativement aigues. La cohérence de l'organisation des filières au sein de ces bassins de production rend difficile toute remise en cause des productions « historiques » et des volumes produits eu égard à des considérations quant à l'emploi local.
La concentration en bassins de production traduit certes une compétitivité locale, mais elle s'est aussi construite sur la sous-évaluation (volontaire ou non) des problèmes environnementaux qu'il convient de gérer maintenant. La mise en œuvre effective de mesures sévères de protection de l'environnement peut se traduire par des modifications des modes de production, voire des productions dans les zones les plus sensibles, et plus particulièrement celles où la concentration d'activités polluantes est importante. Cet aspect de la régulation des pollutions s'avère délicat en terme politique mais n'en est pas moins essentiel.

La loi sur l'implantation des installations classées ou la protection des captages d'eau potable est une mesure bien acceptée visant à préserver l'environnement. Ces mesures permettent d'éviter l'implantation des activités de production jugées potentiellement dommageables à proximité de victimes potentielles. Mais elle n'a pas conduit à délocaliser les activités polluantes existantes. La réglementation peut ainsi limiter les conflits d'usage d'un site potentiel de production. L'avantage de ces mesures est qu'elles organisent *ex ante* l'implantation des activités productives. Il n'y a aucune raison *a priori* pour que les mêmes arguments ne soient pas utilisés afin de justifier l'abandon d'activités polluantes dès lors que les dommages qu'elles occasionnent dépassent un seuil inacceptable, que ces dommages soient maintenant reconnus à leur juste valeur ou, tout simplement, que la nature des conflits d'usage de l'environnement ait évolué. Bien entendu, cette réorganisation ne peut réellement se concevoir qu'à moyen ou long terme.

5. Le secteur agricole, secteurs amont et aval, et compétitivité

5.1. Effets de la régulation sur les secteurs amont et aval

Les agriculteurs et leurs salariés ne sont pas les seuls agents économiques concernés par la régulation de l'utilisation des pesticides. Les producteurs et distributeurs de pesticides sont également directement concernés dans ce contexte. La nature des alternatives aux pesticides implique également que le secteur du conseil aux agriculteurs et de la sélection variétale ont un rôle à jouer si des mesures drastiques de réduction de l'utilisation des pesticides devaient être mises en place.

Dans le cas où l'offre agricole serait modifiée, en quantité et/ou dans sa composition, par la politique en place l'ensemble des secteurs en aval de la production agricole (et *in fine* les consommateurs de

produits alimentaires) subirait des modifications de prix et pourrait être conduit à s'adapter à moyen/long terme.

Très peu d'études cherchent à analyser l'impact potentiel de la régulation des pesticides sur l'activité des secteurs connexes au secteur agricole, même si cette littérature tend à se développer (Lemarié, 2003). Là encore des modèles d'équilibre général calculable pourraient être mobilisés. Mais la concentration du secteur de la production des pesticides et la structure des filières agricoles peut remettre en cause les résultats de ces modèles qui reposent souvent sur des hypothèses de concurrence pure et parfaite.
Quelques études ont porté sur le secteur du conseil, pour l'analyse des relations entre la vente des pesticides et le conseil agricole ou pour l'analyse du rôle de l'Etat dans ce secteur.

De manière générale, un politique visant à réduire de manière conséquente l'utilisation des pesticides tendrait à diminuer la compétitivité des produits agricoles domestiques vis-à-vis de leurs concurrents étrangers et tendrait donc à stimuler les importations de ces produits. Ces importations ne remettraient pas en cause les objectifs de réduction des pollutions de l'environnement (et leurs impacts sur la santé humaine) mais pourraient nuire aux objectifs de protection de la santé des consommateurs de produits agricoles (voir, *e.g.*, Kuchler *et al.*, 1997, pour une étude concernant les Etats-Unis). Il est cependant à noter qu'une politique ambitieuse de réduction de l'utilisation des pesticides et mise en place progressivement peut avoir un impact limité sur la compétitivité des produits domestiques si elle permet aux acteurs concernés de s'adapter aux mesures en place.

Si les signaux émis par les pouvoirs publics donnent des indications claires et crédibles sur le contexte économique et réglementaire de l'utilisation des pesticides, les organismes de recherche, développement, conseil et formation peuvent anticiper les demandes futures des agriculteurs en matière de protection phytosanitaire. Dans une logique d'innovations technologiques induites, cette anticipation permet de proposer à terme des solutions adaptées aux agriculteurs. Une évaluation « complète » des effets de la régulation de l'utilisation des pesticides requiert la prise en compte de l'ensemble des effets présentés ici, ces effets étant d'autant plus importants (en valeurs absolues) et touchant d'autant plus des secteurs « éloignés » de l'agriculture que les objectifs de réduction de la politique sont ambitieux.

5.2. De l'idée du « verrouillage » autour de la protection phytosanitaire chimique

La nécessaire adaptation du secteur agricole et des secteurs connexes à une réduction importante de l'utilisation des pesticides conduit parfois à conclure à un « verrouillage » du système autour du recours quasi-systématique à la lutte chimique pour protéger les cultures (Cowan et Gunby, 1996 ; Wilson et Tisdell, 2001).[4] La notion de « verrouillage » (*lock in*) telle qu'elle définie dans la théorie

[4] Vanloqueren et Baret (2009) analysent le cas de la recherche agronomique à travers deux objets d'étude : l'ingénierie génétique et l'agro-écologie. Leur thèse est que la recherche agronomique est « verrouillée » vis-à-vis des approches réductionnistes, telles que l'ingénierie génétique, et tend à peu laisser de place aux approches plus globales, telles que l'agro-écologie. Les déterminants de cette situation se situent au niveau du contexte économique ou encore au niveau du fonctionnement de la recherche.
Les lobbies des industries productrices d'innovations brevetables jouent un rôle essentiel et ce d'autant qu'elles peuvent travailler en partenariat avec la recherche publique. En outre, les innovations produites par l'ingénierie génétique sont plus faciles à adopter par les agriculteurs que celles issues de l'agro-écologie. Elles sont également source de compétitivité économique. Les recherches en agro-écologie visent essentiellement à proposer des innovations qui ne seront adoptées que si des politiques agri-environnementales se mettent en place. Or l'évolution de ces politiques est pour l'instant peu lisible. Les recherches sur la génétique peuvent être publiées dans des revues prestigieuses et réclament moins de temps que les recherches en agro-écologie qui, en outre, génèrent moins de possibilités de publications. Ces caractéristiques des recherches analysées et la pression imposée aux chercheurs en matière de publication tendent à orienter de manière significative les choix des chercheurs, et en particulier des jeunes.
Les auteurs démontrent également que l'ingénierie génétique s'inscrit parfaitement dans les tendances actuelles de la recherche « générique » (génétique moléculaire, …) et dans le prolongement d'un volet traditionnel de

économique doit cependant être interprétée ici avec précaution, et ce d'autant plus qu'elle ne fait pas l'objet d'un consensus dans la discipline. On parle de situation verrouillée lorsqu'une technologie alternative à la technologie en place s'avère a) économiquement supérieure, *i.e.* plus rentable pour les agents susceptibles de l'employer, mais b) ne parvient pas à s'imposer, *i.e.* n'est pas employée. Les exemples de verrouillage analysés dans la littérature mettent en avant essentiellement deux aspects liés à la transition technologique avortée. Une technologie alternative ne parvient pas à s'imposer si son adoption nécessite d'importants coûts fixes et/ou si la technologie en place fait partie d'un ensemble cohérent de techniques complémentaires, cette cohérence/complémentarité technologique impliquant une organisation du système économique qu'il est difficile de modifier, au moins à court terme.

De fait, l'analyse de la situation de la protection phytosanitaire chimique et des solutions alternatives ou plus généralement des pratiques de production agricole conventionnelles et des pratiques de production économes en pesticides tend à montrer que le critère b) est satisfait. La protection phytosanitaire chimique est une des clés de voute des systèmes de production agricole actuels. Elle permet la spécialisation des exploitations car elle autorise un retour rapide des cultures sur les parcelles. Dans le cas des fruits et légumes, elle permet en outre de garantir l'offre de produits satisfaisant les critères de commercialisation imposés par le secteur de la distribution et/ou les consommateurs, en matière esthétique ou de durée de conservation. Dans le secteur des grandes cultures, l'efficacité technique de la protection phytosanitaire chimique permet la recherche de hauts rendements car elle compense/corrige les effets des densités de semis élevées, des semis précoces ou de la fertilisation azotée massive sur la fréquence et le développement des problèmes phytosanitaires, notamment fongiques (Meynard, 1991). Le désherbage chimique permet en outre d'obtenir des récoltes exemptes d'impuretés. La protection phytosanitaire chimique a donc répondu à des demandes des agriculteurs, en particulier la recherche de hauts rendements pour profiter des prix soutenus par la PAC en grandes cultures (Mahé et Rainelli, 1987 ; Carpentier *et al.*, 1998), et/ou des secteurs en aval de la production agricole, en particulier les exigences de la transformation et de la distribution des fruits et légumes. Mais elle a également induit une organisation spécifique des filières agricoles, par exemple l'association des négoces des intrants et des produits, et des recherches spécifiques. La protection phytosanitaire chimique garantissant une élimination bon marché des problèmes phytosanitaires, la recherche et le développement pouvaient se concentrer sur des semences ou plants peu résistants mais très productifs, ou encore des pratiques de production générant des problèmes sanitaires mais permettant d'obtenir de hauts rendements et des produits satisfaisant les critères de leur commercialisation.

Pourtant, les alternatives à la lutte chimique ou, plus généralement, les pratiques de production alternatives aux pratiques conventionnelles ne satisfont pas nécessairement le critère a). Dit autrement, et c'est là un point essentiel, dans le contexte économique actuel il semble que la protection phytosanitaire chimique et les pratiques de production conventionnelles demeurent très rentables en comparaison avec leurs concurrents. Ce point est certainement celui qui a reçu le plus d'attention de la part des économistes agricoles.

---

recherche agronomique (sélection des plantes, …). Elle permet de proposer des innovations incrémentales au sein de paradigmes bien établis. Les recherches en agro-écologie ne sont pas nécessairement plus récentes mais elles ne peuvent s'appuyer que sur un socle de résultats beaucoup plus restreint. De fait, ce champ de recherche a les caractéristiques d'un champ de recherche relativement récent. Les innovations produites sont encore peu nombreuses et demeurent très perfectibles.

D'après Vanloqueren et Baret, la recherche sur l'agro-écologie ne pourra réellement sortir de sa « niche » qu'à la suite d'une politique volontariste de financements publics, voire d'aménagements quant aux procédures d'évaluation des recherches dans ce domaine pour tenir compte de ses spécificités (pluri-disciplinarité, délai d'obtention des résultats, …).

Il convient pourtant de noter ici que cette réorientation des financements de la recherche publique ne sera elle-même décidée qu'à la suite d'une politique agri-environnementale elle-même volontariste.

Dans une perspective plus globale, la place du secteur agricole au sein de l'économie pose la question d'une part des impacts des politiques agricoles, environnementales, commerciales, … sur l'utilisation des pesticides, et d'autre part l'impact de la politique de régulation sur les finances publiques.

6. Analyse économique de l'utilisation des pesticides

Cette section s'appuie sur la revue de littérature menée par Carpentier *et al.* (2005). Cette synthèse fait suite à celles de Antle (1988), Zilberman et Siebert (1990), Pannell (1991), Carlson et Wetzstein (1993), Michalek (1994), Oskam *et al.* (1997) et Fernandez-Cornejo *et al.* (1998) et sa lecture peut être utilement complétée par celle réalisée par Sexton *et al.* (2007).

La littérature scientifique s'est essentiellement intéressée au cas des pesticides à travers l'analyse de son utilisation par les agriculteurs. Nombre de ces travaux sont théoriques et l'essentiel des travaux empiriques concernent des cas d'étude Nord-Américains. Il convient donc d'être prudent lors de la transposition de ces résultats empiriques. Ensuite, peu d'articles scientifiques ont spécifiquement considéré l'analyse de la régulation des pesticides. La plupart des études spécifiques à la régulation de l'utilisation des pesticides visent à analyser l'impact de l'adoption de contrats portant sur l'adoption de nouvelles pratiques sur l'utilisation des pesticides. Ceci dit, la plupart des études sur l'utilisation des pesticides visent à éclairer un aspect de cette utilisation, cette analyse permettant ensuite une conclusion en matière de régulation.

6.1. De l'élasticité-prix des pesticides

La plupart des études de l'utilisation des pesticides depuis la fin des années 1970 visent à analyser les déterminants de l'utilisation des pesticides par les agriculteurs, voire à quantifier les effets de ces déterminants. Cette littérature vise essentiellement à mesurer l'élasticité prix (propre) des pesticides et à expliquer pourquoi les pesticides sont utilisés massivement, voire « sur-utilisés ».

Des mesures empiriques de la productivité et/ou de l'élasticité prix des pesticides ont été réalisées à partir de l'estimation de fonctions de production et/ou de systèmes de fonction de demande d'intrants et d'offre de produits, dans les deux cas à partir de données agrégées (au niveau d'états des Etats-Unis ; Fernandez-Cornejo, 1992 ; *Lim et al.*, 1993) ou des données micro-économiques (Pays-Bas ; Oskam et al., 1992 ; Oude Lansink, 1993, et France ; Carpentier, 1995). Les estimations obtenues pour les élasticités prix des pesticides sont généralement faibles en valeur absolue à long terme et très faibles à court terme, sauf dans le cas français (Carpentier, 1995 ; Carpentier et Weaver, 1997). Dans les cas d'études européens, les données concernées le secteur des grandes cultures dans les années 1990, *i.e.* la période d'utilisation des techniques de production les plus intensives.
Les modèles les plus récents (Morisson Paul *et al.*, 2002) couplent un système de fonction de demande d'intrants et d'offre de produits à des indicateurs des risques environnementaux générés par les pesticides pour définir les effets sur les choix de production d'objectifs de réduction de ces risques. Les résultats obtenus montrent que la mise en place de plafonds sur les niveaux de risque autorisés tend à modifier significativement les choix de production, ces effets dépendant des choix de production initiaux.

Pour l'évaluation d'effets de politiques de long terme, ces mesures d'élasticité ont pour défaut d'être réalisées à technologie de production « constante ». De fait, les paramètres estimés des modèles considérés reflètent les effets des prix lorsque la technologie de production employée est celle utilisée par les agriculteurs dans les données disponibles.
Même lorsque différentes pratiques sont employées par les agriculteurs de l'échantillon utilisé, les paramètres estimés reflètent la pratique majoritairement employée. Les élasticités calculées ne tiennent donc pas compte de ce que les agriculteurs peuvent adopter des technologies alternatives déjà disponibles, sauf si le modèle estimé considère explicitement la cohabitation des différents pratiques dans l'échantillon, ce qui n'a jamais été réalisé à notre connaissance.
La programmation mathématique (éventuellement la programmation mathématique positive) permet d'analyser les effets de modifications du contexte économique sur les choix de production à partir des

changements de pratique (et d'assolement) induits. Ces pratiques peuvent d'ailleurs n'être pas encore adoptées pourvu que leurs paramètres techniques soient connus, par exemple à partir de l'exploitation de données expérimentales. Jacquet *et al.* (2009) analysent les effets potentiels de taxes sur les pesticides et de subventions à l'utilisation de pratiques de production spécifiques (raisonnée ; « bas intrants/variétés rustiques » ; agriculture biologique) sur les utilisations de ces intrants à partir des changements de pratique potentiels.

6.2. De la « sur-utilisation » des pesticides

Il est souvent avancé que les agriculteurs « sur-utilisent » les pesticides, *i.e.* qu'ils utilisent les pesticides même lorsque cela ne paraît pas justifié. Cette éventuelle « sur-utilisation » de pesticides impliquerait que l'utilisation de techniques de production plus économes en pesticides, et en particulier le dépistage des infestations, serait une stratégie gagnante-gagnante (*win-win*) au sens de Porter (voir, *e.g.*, Porter et van der Linde, 1995). En effet, adopter ces pratiques non seulement réduirait l'utilisation des pesticides et donc leurs pollutions mais accroîtrait le revenu des agriculteurs.

La plupart des économistes, en vertu de l'utilisation du principe de rationalité, tendent à rejeter l'idée selon laquelle les agriculteurs « gaspilleraient » les pesticides.[5] S'il est possible que certains agriculteurs soient réellement inefficaces dans l'utilisation des pesticides, la plupart d'entre eux les utilisent d'une manière efficace étant donnés leurs objectifs, le contexte économique dans lequel ils évoluent et les contraintes auxquelles ils font face. Aussi, s'ils utilisent trop de pesticides du point de vue de la société, ils ne les gaspillent pas de leur propre point de vue.
Il existe actuellement des techniques de production qui permettraient d'utiliser moins de pesticides que dans le cadre des pratiques actuellement mises en œuvre. Or ces techniques de production ne sont pas ou sont trop peu utilisées. Comme cela sera vu dans la suite, ce constat est valide tant en France, qu'en Europe ou aux Etats-Unis. L'un des principaux objectifs de cette partie est de mettre en évidence les facteurs qui expliquent cet état de fait.

Il convient ici de définir précisément cette notion de « sur-utilisation » et pourquoi elle doit être employée avec précaution. Du point de l'analyse économique néo-classique, le terme sur-utilisation ne peut être employé qu'en référence à un optimum social. Sans intervention publique, les pesticides sont effectivement sur-utilisés par les agriculteurs en référence à l'optimum social, *i.e.* l'optimum privé d'utilisation des pesticides (choix des agriculteurs) est supérieur à l'optimum social de cette utilisation eu égard aux pollutions générées par les pesticides.
Autrement, l'hypothèse de rationalité des agriculteurs implique que les agriculteurs utilisent les quantités optimales de pesticides compte-tenu de leurs objectifs.[6] Dans les débats impliquant des non-économistes autour de l'utilisation des pesticides, la référence utilisée pour l'utilisation « normale » de pesticides est souvent la quantité de pesticides qui serait utilisée par un expert en protection des cultures. Cette référence néglige deux aspects importants de l'utilisation des pesticides par les agriculteurs. Tout d'abord, les agriculteurs sont en général moins informés que des experts sur l'état sanitaire (réel ou vraisemblable) de leurs cultures. Suivre l'état sanitaire des cultures suppose des connaissances et requiert du temps de travail, principalement d'observation (Carpentier, 1996 ; Carpentier *et al.*, 2005 ; Sexton *et al.*, 2007). Certains agriculteurs, par exemple ceux pour qui l'élevage est une activité importante, ont un coût d'opportunité du temps qui peut expliquer qu'il leur est peu rentable de raisonner leur protection phytosanitaire. De même, bien que leur expérience puisse compenser un éventuel déficit de connaissances académiques, les agriculteurs ne sont pas tous formés spécifiquement à la protection des cultures raisonnée. En outre, en particulier pour les agriculteurs les

[5] Et, par conséquent, l'idée de Porter selon laquelle le renforcement des politiques de préservation de l'environnement pourrait à la fois accroître l'efficacité économique privée des entreprises et la qualité de l'environnement (Jaffee *et al.*, 2002).
[6] Très peu d'études ont analysé l'utilisation des pesticides à partir des notions d'inefficacités, certainement en raison du caractère aléatoire des problèmes phytosanitaires. Une étude récente de Boussemart *et al.* (2008). utilise toutefois des mesures d'inefficacités pour analyser des agriculteurs l'attitude face au risque phytosanitaire.

plus âgés, la protection chimique systématique, *i.e.* établies selon un calendrier de traitements, a longtemps été la règle.
Ensuite, et c'est là une conséquence du point précédent, faisant face à une incertitude donnée différents individus peuvent réagir différemment selon leur attitude intrinsèque face au risque (aversion face au risque, voire à face l'ambiguïté) ou selon les contraintes qui pèsent sur leurs décisions (alimentation d'un cheptel, notamment en fourrage ou encore contraintes financières, Carpentier *et al.*, 2005).

6.3. Pesticides, risque et information

Les travaux théoriques de Feder (1979) ont eu une influence considérable sur l'analyse des utilisations d'intrants agricoles. Partant du principe que les intrants tels que les pesticides et les engrais modifient le l'aléa de récolte, Feder (1979) a mis en avant d'une part le rôle de l'information sur l'état sanitaire et les besoins en fertilisants des cultures, et d'autre part le rôle de l'aversion face au risque.
Le rôle de l'aversion face au risque sur l'utilisation des pesticides a donné lieu à de nombreux travaux théoriques (*e.g.*, Leathers and Quiggin, 1991 ; Ramaswami, 1992 et 1994) et empiriques, ces derniers utilisant principalement les approches économétriques développées par Antle (1987, 1988) et Just et Pope (1978, 1979). Les résultats d'Antle (1988) confirment à la fois le fait que les pesticides réduisent l'aléa de récolte (mesuré par sa variance) et que les agriculteurs tendent à utiliser les pesticides au-delà du niveau garantissant le profit espéré maximum sur des données provenant d'un échantillon de producteurs californiens de tomates. Carpentier (1995) et Carpentier et Weaver (1997b) confirment également ce résultat pour un échantillon de producteurs français de grandes cultures. Les résultats de Hurd (1994) et Huang (1993) tendent à montrer que les pesticides n'ont pas d'effet significatif sur la variance des rendements agricoles.
Cependant, il convient de ne pas surestimer l'impact de l'aversion face au risque des agriculteurs. Par exemple, Carpentier (1995) montre que l'attitude risquophobe des agriculteurs n'explique de 10 à 15% des utilisations de pesticides des producteurs français de grandes cultures au début des années 1990. De fait, l'utilisation des pesticides s'explique en grande partie par leurs effets sur les rendements espérés, *i.e.* « en moyenne ».

Le rôle de l'aversion face au risque a été intégré aux recherches des économistes sur les pesticides pour comparer les distributions des marges issues de différentes technologies de production au sens de la dominance stochastique (Zacharias et Grube, 1984), mais surtout pour analyse l'impact de contrats d'assurance financière des récoltes sur l'utilisation des pesticides.
S'il est possible de montrer que l'assurance récolte et les pesticides sont substituts dans le cas mono-produit et mono-intrant (Ramaswami, 1994), ce résultat théorique ne tient plus nécessairement dans le cas général. Carpentier (1995), Lichtenberg et Horowitz (1994) et Chakir et Hardelin (2009) donnent des contre-exemples dans le cas multi-intrants. Ceci-dit, les études empiriques menées aux Etats-Unis concluent généralement que les quantités d'intrants chimiques tendent à diminuer sur les cultures (très largement) assurées dans le cadre du *Crop Insurance Program* (Quiggin *et al.* 1996 ; Wu, 1999).
Ceci-dit, les études empiriques menées aux Etats-Unis tendent également à montrer que les effets de l'assurance récolte tendent à accroître l'utilisation de pesticides à la marge extensive, des cultures risquées et gourmandes en pesticides remplaçant des cultures moins risquées et économes en pesticides (Soule *et al.*, 2000 ; LaFrance *et al.*, 2001).
Il convient donc d'être prudent dans l'analyse des effets de l'assurance sur l'utilisation des pesticides. En outre, il convient également de rappeler qu'un contrat d'assurance récolte actuariellement juste, *i.e.* dont les primes paient les remboursements en moyenne, ne se substitue qu'à une partie de l'utilisation des pesticides, celle qui permet aux agriculteurs de contrôler l'aléa de récolte. Etant donné qu'une large part des pesticides utilisés est rentable en moyenne, la part qui contrôle spécifiquement l'aléa de récolte est relativement petite.
Ceci-dit, certains contrats d'assurance pourraient permettre de réduire l'utilisation de certains pesticides. Des risques peu fréquents et exogènes pourraient être assurés (à l'instar des contrats sur les risques climatiques proposés aux agriculteurs français), si leurs dégâts sont aisément identifiables, afin d'éliminer des traitements systématiques mais généralement inutiles.

Les travaux sur l'information sont plus rares que ceux sur l'aversion face au risque. Carpentier (1996) et Carpentier *et al.* (2005) analysent les déterminants de la valeur du dépistage des infestations phytosanitaires et des coûts d'opportunités liés à la « production » du dépistage.
La valeur économique de l'information dépend, entre autres, des rapports prix des pesticides/prix des produits et de l'ampleur de l'aléa d'infestation. Dans le cas où les pesticides sont utilisés par prévention (traitements systématiques), l'information apportée par le dépistage et les pesticides sont des substituts, *i.e.* l'utilisation du dépistage réduit l'utilisation des pesticides. Dans le cas où les pesticides sont trop onéreux pour être utilisés en prévention, le dépistage et les pesticides sont des compléments, *i.e.* l'information apportée par le dépistage permet de n'utiliser les pesticides qu'à bon escient alors qu'ils ne seraient pas utilisés autrement. De fait, l'analyse de la valeur du dépistage illustre un aspect essentiel du rôle du prix des pesticides : plus il est élevé plus il favorise la rentabilité comparée des alternatives à lutte chimique. Il convient également de remarquer que l'information n'a de valeur que si elle élimine un aléa. Aussi, lorsque les pesticides sont relativement bon marché, le dépistage présente un intérêt très limité dans le cadre de pratiques de production induisant des problèmes phytosanitaires quasi-systématiques. Dans ce cas le dépistage permet de n'éviter qu'un nombre très limité de traitements. Là encore le prix relatif des pesticides joue un rôle essentiel : des pesticides relativement bon marché favorisent l'utilisation de pratiques intensives et réduisent l'intérêt du raisonnement des traitements.
Enfin, le dépistage ne procure pas en général une information parfaite. S'il apparaît trivial d'affirmer qu'une infestation est présente lorsqu'elle constatée, il est généralement impossible d'affirmer avec certitude qu'une infestation est absente lorsqu'elle n'est pas constatée. Aussi, toute impasse sur un traitement suppose une prise de risque. Dans le cas où l'infestation potentielle présente un risque économique majeur, comme c'est le cas de certaines infestations pour les fruits et légumes parce qu'elles peuvent remettre en cause la commercialisation des produits infestés, cette prise de risque a peu de chances d'être assumée par le producteur, et cela en dehors de toute considération relative à l'aversion face au risque. Dans ce cas, les traitements systématiques apparaissent très rentables en moyenne. Même si le dépistage montre que la probabilité d'infestation est faible, le niveau de la perte potentiel est tellement élevé que le traitement préventif demeure très rentable « en moyenne ».
Les travaux théoriques cités ci-dessus sont liés aux travaux empiriques de Just *et al.* (2002) sur les coûts de l'information en particulier sur le rôle prépondérant joué par le capital humain dans cette production.

Il convient finalement de mentionner deux aspects de l'analyse des choix des agriculteurs en avenir incertain. Tout d'abord, il est très difficile de distinguer les effets de l'aversion face au risque de ceux de la perception de l'incertitude (Carpentier, 1995 ; Just, 2008). En effet, un agriculteur averse face au risque avec une perception « moyenne » de l'incertitude prendra des décisions similaires à celles d'un agriculteur neutre face au risque mais avec une perception de l'incertitude plus pessimiste que la moyenne.
Dans le même ordre d'idée les effets de l'aversion face au risque peuvent facilement être confondus avec ceux de contraintes comme celles pesant sur le crédit (Roumasset, 1977 ; Cressy, 2000) ou celles induites par l'alimentation d'un cheptel (Carpentier, 1995).
Définir la source des comportements d'auto-assurance ou d'auto-protection des agriculteurs s'avère crucial pour le choix de politiques de régulation. Par exemple, proposer un contrat d'assurance financière sur la récolte de fourrage d'un éleveur qui sait ne pouvoir se procurer de cet intrant sur le marché n'a aucun intérêt.
Ces exemples montrent que la rationalité des choix des agriculteurs est finalement encore assez mal connue. A cela s'ajoute en outre la question de l'anticipation des prix des produits agricoles qui tendent à être de plus variables qu'auparavant, sans compter ceux des intrants, énergie et engrais chimiques en tête.

6.4. Pesticides et technologies de production agricole

Une des grandes questions empiriques soulevées par le rôle des pesticides dans la production agricole dans les années 1970/1980 agricole est la mesure de leur productivité marginale. Or les productivités marginales (espérées) estimées jusqu'au milieu des années 1980 tendent à montrer que les pesticides

sont plutôt en-deçà du niveau requis pour la maximisation du profit espéré). Plusieurs explications sont proposées à cette vraisemblable sur-estimation de la productivité marginale des pesticides : un biais de forme fonctionnelle (Lichtenberg et Zilberman, 1986b) ou un biais d'hétérogénéité/endogénéité (Carpentier, 1995 ; Carpentier et Weaver, 1996 et 1997).

Les travaux de Lichtenberg et Zilberman (1986b) sur la représentation du rôle de protection des pesticides à travers la spécification d'une fonction de réduction de dommages a été à l'origine d'une abondante littérature empirique aux résultats mitigés quant au rôle des fonctions de réduction des dommages (*e.g.*, Carrasco-Tauber et Moffitt, 1992, et Kuosmanen *et al.*, 2006). Ces travaux sont également à l'origine de travaux plus génériques sur la spécification des effets des intrants agricoles dans les fonctions de production en relation avec leur rôle agronomique (Wossink and Rossing, 1998 ; Zhengfei *et al.*, 2006).

La question des résistances aux pesticides ont très tôt fait l'objet de travaux économiques. Hueth et Regev (1974) considèrent les stocks de populations de déprédateurs non résistants comme un stock de ressource renouvelable, qui diminue la production agricole et accroît la productivité des pesticides mais qui se dégrade avec l'utilisation de ces produits. Ces auteurs déterminent alors les caractéristiques de la gestion optimale des stocks de populations résistantes à partir de méthodes de contrôle optimal.
Dans le cas de déprédateurs mobiles, les stocks de populations de déprédateurs non résistants doivent également être analysés comme des biens publics dont la gestion doit être coordonnée par les pouvoirs publics. Les travaux pionniers de Hueth et Regev (1974) ont connu un regain d'intérêt à partir de la fin des années 2000 en raison des développements de résistances liés à l'utilisation massive de certains couples de variété OGM et pesticides (Sexton *et al.*, 2007). Ces travaux servent à l'analyse de l'intérêt des zones refuges (Bouguet *et al.*, 2005).

Enfin, les rares travaux sur l'utilisation des pesticides pour la production de fruits et légumes ont mis en évidence un aspect essentiel du rôle de protection phytosanitaire pour ces secteurs de la production agricole. En effet, les exigences de commercialisation des fruits et légumes sur les marchés de frais sont très strictes quant à l'aspect et à l'état sanitaire des produits. Des produits ne satisfaisant pas à certaines normes ou standards esthétiques ou sanitaires sont très rapidement déclassés en produits pour la transformation, à des prix bien moins rémunérateurs que ceux des marchés de frais, ou tout simplement déclarés non commercialisables. Les pesticides garantissent donc à la fois le rendement et le niveau de qualité des fruits et légumes, ce dernier étant un déterminant essentiel des niveaux de prix reçus par les producteurs. Babcok *et al*. (1992), pour la production de pommes en Caroline du Nord, et Starbird (1994), pour la production de tomates en Californie, montrent qu'une large part des pesticides utilisés pour ces productions (30% dans le cas des pommes) vise à garantir l'aspect des produits. Ces utilisations de pesticides sont nécessaires au producteur qui désire écouler sa production sur les marchés les plus rémunérateurs.

Dans la plupart des cas, les déterminants de l'utilisation des pesticides sont analysés dans le cadre de modèles mono-intrants. De rares analyses considèrent le rôle de protection phytosanitaire, et donc des pesticides au sein du processus de production agricole.

L'importance du mouvement d'intensification des pratiques culturales pour l'explication de l'utilisation massive de pesticides par les producteurs français de céréales et d'oléo-protéagineux est maintenant bien connue (Meynard, 1991). Les pratiques culturales intensives peuvent être définies comme l'ensemble des techniques permettant de tirer au mieux profit du potentiel génétique de la plante cultivée, de la qualité des sols utilisés et de l'ensoleillement disponible sur la parcelle considérée. Ces techniques favorisent (augmentation des densités de semis, utilisation de cultivars très productifs mais peu résistants, utilisation massive d'engrais, irrigation, avancée des dates des semis) voire stimulent, dans certaines conditions (utilisation massive d'engrais, irrigation), les infestations des cultures.
Cet aspect est rarement examiné dans la littérature économique concernant l'utilisation des pesticides. Seuls Harper et Zilberman (1989) et Carpentier (1995) analysent formellement et confirment

empiriquement les effets de cette endogénéité des infestations par rapport à la fertilisation azotée. Antle (1988) et Wetzstein et Carlson (1993) ne font que l'évoquer.
Carpentier (1995) dans le cas des grandes cultures françaises analyse ces relations sous l'angle de la complémentarité entre la fertilisation et la protection phytosanitaire. Harper et Zilberman (1989) analysent ces questions sous l'angle des effets externes de l'utilisation d'engrais sur l'état sanitaire des parcelles. Ceci s'explique probablement par la prépondérance des études appliquées à l'agriculture américaine. En effet, cette dernière est, de façon générale, plus extensive que l'agriculture européenne.

Cette absence d'études empiriques et théoriques est assez malheureuse dans la mesure où les pollutions par les pesticides sont souvent liées aux pollutions par les engrais, tout au moins en production végétale. Une meilleure connaissance des relations techniques liant la fertilisation et la protection phytosanitaire pourrait nourrir des travaux sur les éventuelles possibilités de coordination entre les politiques de régulation des pollutions par les engrais et les pesticides.

Dans la même logique, les rotations culturales et l'allongement des délais de retour des cultures sur les parcelles comptent parmi les piliers des systèmes de production intégrée visant à réduire l'utilisation des pesticides. Très peu d'analyses économiques concernent ces techniques de gestion du risque phytosanitaire. Zacharias et Grube (1984, 1986) montrent que les rotations soja-maïs permettent aussi de limiter l'utilisation de pesticides pour éliminer les nématodes infestant le soja (voir également Hennessy, 2007 et Livingston *et al.*, 2008). Les travaux sur les rotations de, *e.g.*, Eckstein (1984), Ozarem et Miranowski (1994) ou Thomas (2003), ne concernent que les stocks d'éléments fertilisants ou ne concernent que des rotations n'impliquant que deux cultures. L'analyse et la modélisation des choix de rotations sont très complexes car elles requièrent la combinaison d'aspects agronomiques, d'éléments d'optimisation dynamique, de décisions discrètes et continues en avenir incertain, …

De manière générale, les modèles utilisés pour représenter les choix des agriculteurs demeurent relativement frustes pour ce qui concerne la représentation de la technologie de production agricole, malgré des efforts récents pour améliorer ce point.
Ceci est problématique car comprendre le rôle de la protection phytosanitaire dans la production agricole permet d'analyser le rôle des pesticides la relative dépendance de cette production vis-à-vis de ces intrants. De fait, une réduction importante de l'utilisation des pesticides est difficile dans le cadre des pratiques de production actuelles, *i.e.* ne peut être réalisée à la marge, et appelle des changements de pratique plus « radicaux ».

7. Analyse technico-économique de la dépendance de la production agricole vis-à-vis des pesticides

La protection phytosanitaire, et les pesticides en particulier, occupent une place centrale dans les systèmes de production actuellement utilisés. Quatre points issus de l'analyse technico-économique (Aubertot *et al.*, 2005b) permettent de structurer l'analyse du rôle des pesticides et des alternatives à leur utilisation. Tout d'abord, l'utilisation de pesticides chimique est, dans l'immense majorité des cas, le moyen le plus efficace pour résoudre un problème phytosanitaire, tout au moins à court terme. Les alternatives pouvant se substituer à l'utilisation des pesticides n'ont qu'une efficacité partielle comparée à celle des pesticides chimiques.
Ceci implique, et c'est là le second point, que lorsque certains problèmes doivent nécessairement être éliminés, l'utilisation des pesticides chimiques est bien souvent la meilleure solution disponible pour les agriculteurs. Dans le cas des fruits et légumes, et plus particulièrement pour ceux destinés au marché de frais, les contraintes pesant sur la commercialisation des produits rend pratiquement nécessaire l'utilisation de pesticides. Ces contraintes sont « exogènes » aux systèmes de production considérés et appellent une solution impliquant d'autres secteurs que celui de la production agricole.
Ensuite, la recherche de hauts rendements et la volonté de se spécialiser pour, *e.g.* exploiter des rendements d'échelle, impliquent la mise de techniques qui génèrent des problèmes phytosanitaires. Il est maintenant bien connu que les techniques de production intensive en grandes cultures reposent sur l'utilisation de quantités importantes d'herbicides et de fongicides notamment (Aubertot *et al.*, 2005a). De même la spécialisation des exploitations limite le recours aux effets bénéfiques des rotations

culturales.[7] Ici, le besoin en matière de protection est, au moins en partie, défini de manière « endogène », *i.e.* généré par les pratiques de production employée. Dans ce contexte, une solution pour réduire l'utilisation des pesticides consiste à diminuer le besoin de protection phytosanitaire. Cette diminution du besoin de protection suppose soit de réduire les rendements objectifs, soit de diversifier les cultures pratiquées sur l'exploitation.[8] Ces changements n'impliquent pas que la seule protection phytosanitaire.
Enfin, il semble que compte des rapports de prix observés depuis la fin des années 1990, la protection phytosanitaire chimique demeure très rentable économiquement pour la plupart des cultures.[9] Pourtant, cette rentabilité dépend de prix qui peuvent être très variables. Par exemple, la rentabilité, en terme de marges brutes, des couples « variétés rustiques-ITK bas intrants » dont la rentabilité est prouvée pour un prix du blé inférieur à 120-130€/tonne **(…)**. La notion de dépendance des cultures aux pesticides est souvent associée à la seule dimension technique de la production agricole alors que sa dimension économique est également essentielle. De fait, de nombreuses solutions techniques alternatives à l'utilisation de pesticides chimiques sont disponibles mais peu d'entre elles sont mises en œuvre pour des raisons essentiellement économiques. Le critère économique est ici à entendre au sens large, *i.e.* dans un cadre plus large que celui de la marge brute. Ce point sera discuté plus bas.

Du point de vue économique, les différentes alternatives permettant de réduire l'utilisation des pesticides peuvent être classées (et en partie ordonnées) en fonction des changements qu'elles impliquent dans les choix de production des agriculteurs (Carpentier *et al.*, 2005).[10] Ces alternatives sont présentées ici de manière un peu « caricaturale » afin de faire ressortir leurs principaux avantages et inconvénients. Bien entendu, la typologie dressée ici n'exclut pas l'utilisation conjointe de différentes techniques, bien au contraire. On retrouve l'idée de cette utilisation conjointe dans les logiques dites « intégrées ».[11]
La référence utilisée est l'utilisation préventive de pesticides, *i.e.* l'utilisation de pesticides contre des risques phytosanitaires vraisemblables et potentiellement dommageables compte-tenu des pratiques de production choisies et du contexte économique en vigueur. Cette référence est généralement définie comme la pratique actuelle pour une large majorité d'agriculteurs. Cette utilisation préventive, parfois nommée utilisation systématique, permet de suivre un calendrier de traitements préétabli. Cette pratique est rentable en moyenne, simple à mettre en œuvre, sécurisante et peut être employée dans n'importe quel contexte. De fait, ces trois aspects de l'utilisation préventive des pesticides font que les alternatives potentielles à cette forme de protection phytosanitaire peuvent difficilement la concurrencer.

---

[7] Les effets de cette spécialisation sont mis en évidence en grandes cultures et en maraîchage où la spécialisation fait l'objet d'un choix économique. La spécialisation est inhérente dans le cas des cultures pérennes, fruits et vigne.

[8] Même si la mise en place de rotations culturales peut impliquer plusieurs exploitations, à l'instar de certaines pratiques observées dans des zones mixtes de productions maraîchère et animale comme le Cotentin en France.

[9] Il convient cependant de noter ici que certaines alternatives aux pesticides ont été massivement adoptées par les producteurs agricoles français. On peut par exemple citer la confusion sexuelle dans les vergers ou, plus généralement, les techniques de lutte biologique dans les cultures sous serres (EcoPhyto R&D, 2009).

[10] Les idées à la base de cette typologie se retrouvent, au moins en partie, dans le paradigme « efficacité/substitution/refonte » des pratiques de production proposée par Hill et McRae (1995) (voir également Deverre et de Sainte Marie, 2008 ou Bellon *et al.*, 2006). Les notions d'efficacité et de substitution tels qu'ils sont définis par Hill et McRae (1995) sont ici intégrées. D'un point de vue économique l'amélioration de l'efficacité de la lutte chimique, *i.e.* utiliser moins de pesticides pour atteindre le même niveau de protection, suppose une substitution d'intrants : les pesticides chimiques par de l'information et du travail (de pilotage), voire du capital humain. La notion de « refonte » utilisée ici ne s'applique qu'au cas des systèmes de production, *i.e.* à l'échelle de l'exploitation.

[11] Ne sont considérées ici que les pratiques qui peuvent être mises en œuvre à l'échelle d'une exploitation. Sont donc ici exclues les logiques visant à coordonner les décisions des agriculteurs pour gérer les problèmes posés par des déprédateurs mobiles à l'échelle d'un bassin de production. De telles logiques n'ont, à notre connaissance, été analysée par les économistes agricoles que dans le contexte de la gestion des phénomènes de résistance, et plus particulièrement dans le cas des cultures OGM (voir, *e.g.*, Sexton *et al.*, 2007).

Réduire l'utilisation des pesticides sans modifier les autres choix de productions (dates et densité de semis, fertilisation, successions culturales, …) suppose de trouver des substituts aux traitements chimiques pour gérer des problèmes phytosanitaires qui ne sont pas modifiés. Trois types de substituts existent : la lutte biologique qui remplace les pesticides chimiques par des ennemis naturels des déprédateurs des cultures, la lutte raisonnée qui schématiquement remplace les traitements inutiles par l'utilisation d'information sur l'état sanitaire des parcelles (prévisions de modèles ou dépistage) et l'emploi de variétés résistantes.[12] La protection phytosanitaire intégrée utilise une ou plusieurs de ces techniques.
Ces alternatives n'offrent généralement que des solutions partielles à l'emploi de pesticides chimiques. Les résistances ne concernent que quelques maladies ou insectes. La lutte raisonnée ne peut être pratiquée que si l'infestation peut-être détectée à temps et implique généralement une prise de risque. Le contrôle des infestations autorisé par la lutte biologique implique généralement un seuil de tolérance quant aux dégâts commis par les ennemis des cultures.
En outre, la lutte raisonnée comme la lutte biologique reposent sur des connaissances spécifiques et requièrent du temps de pilotage. Elles ne peuvent donc être mises en œuvre que par des producteurs bien formés, sont coûteuses en travail et impliquent de tolérer certains risques. Ces alternatives à la lutte chimique préventive peuvent donc apparaître plus rentables que cette dernière selon un bilan comptable standard sans être adoptée pour autant étant donnés les coûts implicites qu'elles engendrent, en termes de travail, de formation ou encore de prise de risque.

Il est également possible de réduire l'utilisation de pesticides en réduisant le besoin de protection des cultures. Deux types de pratiques emploient cette logique prophylactique : la production intégrée et l'approche par les systèmes de production intégrés ; ces approches « intégrées » mobilisant également les pratiques de protection intégrée.

L'approche par la production intégrée vise à modifier les choix aux niveaux de l'implantation (date et densité des semis) et de la fertilisation d'une culture afin de réduire la pression des problèmes phytosanitaires. De fait, cette approche vise à éliminer ou réduire l'incidence des éléments des itinéraires techniques de production intensive à la source de problèmes phytosanitaires. En grandes cultures, l'exemple emblématique de la production intégrée est celle dite des « techniques à bas niveaux d'intrants ». La logique de la construction des itinéraires techniques et de diminuer les rendements objectifs, et donc l'objectif de revenu brut, afin de diminuer le besoins en intrants chimiques de la culture, et donc les coûts de production. Cette « extensification » des pratiques culturales s'avère rentable, tout au moins d'un point de vue comptable, lorsque le rapport des prix de la culture sur ceux des intrants est relativement faible. Dans le cas de prix de production élevés, les techniques les plus intensives demeurent les plus rémunératrices. Cette logique a surtout été proposée dans le cas des grandes cultures, et plus particulièrement en réponse aux baisses du prix de ces productions induites par la réforme de la PAC de 1992.
Les techniques de la production intégrée diminuent mais n'éliminent pas les risques phytosanitaires. Elles sont de fait complémentaires des techniques de la protection intégrée, et en particulier des techniques de la lutte chimique raisonnée. En effet, les techniques de production très intensives génèrent des problèmes phytosanitaires très fréquents et potentiellement très pénalisants en exposant la culture à de nombreux déprédateurs et maladies et en créant les conditions favorables au développement des adventices et de certaines infestations fongiques. Raisonner les traitements s'avère relativement peu utile dans ce contexte puisque l'occurrence des problèmes est généralement très vraisemblable. De plus, le rendement potentiel à protéger étant plus élevé, les pertes potentielles liées à une impasse mal choisie peuvent être conséquents. En revanche, les problèmes phytosanitaires deviennent moins fréquents et donc plus aléatoires dans les techniques de la production intégrée ce qui rend l'intérêt de raisonner les traitements plus conséquent. Schématiquement, c'est essentiellement le caractère aléatoire des infestations (en combinaison avec l'ampleur des dégâts potentiels) qui fonde la valeur économique de l'information apportée par le dépistage : cette valeur augmente avec le coût

[12] La gestion des résistances induites par l'utilisation fréquente d'un pesticide fait appel aux techniques décrites ici.

associé aux traitements inutiles évités. Le nombre de traitements réellement inutiles tend à diminuer avec l'intensité des pratiques culturales.

Dans les systèmes de production intégrée, l'ensemble des choix de production est refondé de manière à réduire la pression phytosanitaire. Aux techniques de la protection et de la production intégrées est adjointe l'exploitation des effets bénéfiques de certaines successions culturales ou celle de l'organisation spatiale des productions.
Deux types de successions culturales peuvent être mobilisées : celles impliquant des cultures « commerciales » ou celles impliquant des cultures intermédiaires « non commerciales ». Dans le premier cas le principe consiste à allonger le délai de retour des cultures sur les parcelles au-delà des deux à trois années des schémas de rotation usuels (en grandes cultures ou en maraîchage) alors que le second principe vise à exploiter le pouvoir assainissant de certaines plantes (éventuellement en association avec un apport en éléments fertilisants ou en matière organique). Bien entendu les systèmes intégrés ne concernent pas les cultures pérennes.
L'organisation spatiale des productions pour gérer le risque phytosanitaire a peu été étudiée par les économistes agricoles. L'analyse de l'organisation spatiale s'est en outre concentrée sur la question de la gestion des résistances et, généralement à une échelle plus large que celle de l'exploitation agricole (Alix et Zilberman, 2003).[13]

Les systèmes de production intégrés génèrent généralement des coûts supplémentaires, liés aux cultures intermédiaires non commercialisées, et des coûts d'opportunité. En effet, allonger le délai de retour des cultures principales, généralement les plus rémunératrices, suppose l'accroissement de la sole des cultures moins rémunératrices, voire l'introduction de nouvelles espèces. Ces coûts d'opportunité sont définis à partir des différences de revenus nets (des gains en matière de protection phytosanitaire) générés par les différentes cultures (pour une succession donnée), voire des pertes en termes d'économie d'échelle.
L'agriculture biologique peut être vue comme un système de production intégré qui s'interdit l'emploi de pesticides et d'engrais de synthèse. A l'inverse les systèmes de production intégrés ne s'interdisent l'emploi de ni de l'un, ni de l'autre. Leur définition n'indique aucun niveau « plafond » d'emploi de ces produits ce qui rend leur qualification difficile en pratique, un système pouvant être plus ou moins intégré. Dans une certaine mesure, un système de production avec des itinéraires techniques intensifs basé sur une rotation colza/blé/orge est « plus intégré » qu'un système avec des itinéraires techniques similaires mais basé sur une rotation colza/blé.

De fait, les systèmes de production intégrés, à l'instar de l'ensemble des pratiques décrites ici, ne sont réellement rentables que si la lutte chimique est coûteuse. Force est de constater que les pesticides ne sont pas assez onéreux pour stimuler l'adoption « massive » de ces pratiques.
En outre, comme cela a été noté ci-dessus les pratiques économes en pesticides diminuent mais n'éliminent pas les risques phytosanitaires. Cette caractéristique, parfois désignée par le terme d'efficacité partielle, des alternatives à la lutte chimique préventive peut s'avérer particulièrement pénalisante dans certains cas. La logique « zéro défaut » s'impose à certains produits agricoles, comme les fruits et légumes vendus en frais. Dans ces cas, l'enjeu financier de la protection phytosanitaire est tel qu'il est certainement difficile aux producteurs de se contenter de techniques à « efficacité partielle ».
Enfin, si les pratiques de production intensive ont cherché à optimiser le fonctionnement des processus de développement et de croissance des cultures en éliminant au maximum leurs facteurs limitants de manière plus ou moins artificielle, les pratiques intégrées visent à utiliser au maximum le fonctionnement de l'éco-système agricole afin d'optimiser le fonctionnement des processus biologiques pour limiter le recours à l'utilisation des intrants chimiques. On parle ainsi d'«écologisation » des pratiques culturales en référence à l'« artificialisation » des pratiques de production agricole ayant conduit aux pratiques de production les plus intensives (Deverre et de Sainte Marie, 2008). Aussi, si les pratiques intensives s'affranchissent par principe au maximum des

[13] L'organisation des zones refuges dans le cas des résistances induites par l'utilisation de couples variété OGM/pesticide demeure traitée de manière relativement fruste (Bouguet *et al.*, 2005).

contingences locales et temporelles, les pratiques intégrées apparaissent bien plus dépendantes de ces contingences. Ceci implique que si les pratiques de production intensives peuvent dans une très large mesure s'appuyer sur un ensemble de « recettes » stables dans l'espace et le temps ; les pratiques de production intégrées doivent probablement plus être vues comme des principes d'action généraux à adapter localement et en continu que comme des recettes « immuables ». Les pratiques intégrées apparaissent donc plus difficiles à maîtriser, car elles doivent d'abord être conçues au cas par cas. Ceci entraîne que ces pratiques sont qualifiées d'« intensives en information et en connaissances (ou capital humain, *i.e.* formation et expérience) » par les économistes qui souhaitent généralement raisonner en termes d'intrants. Il est cependant à noter que les pratiques alternatives aux pratiques intensives sont encore peu employées et ont, pour l'instant, fait l'objet d'un effort de recherche encore limité (Aubertot *et al.*, 2005b). Ils sont donc encore perfectibles, ne serait-ce que parce qu'ils peuvent encore être optimisés.

De ce fait, la dépendance des systèmes de production actuelle est relative d'une part aux pratiques de production utilisées, et aux types de production considérée. Les grandes cultures sont les cultures apparaissent comme les moins dépendantes « techniquement » des pesticides dans la mesure où différentes solutions semblent disponibles pour réduire l'utilisation de pesticides. En outre, les efforts de recherche conduits sur la production intégrée de ces cultures tendent à montrer que des itinéraires techniques relativement simples peuvent être économiquement aussi performants que les itinéraires techniques conventionnels à des niveaux de prix actuellement observés **(…)**. L'offre d'alternatives semble moins large actuellement pour les cultures légumières et les cultures fruitières/viticoles. Le caractère pérenne de ces dernières limite les alternatives potentielles. Cette dépendance purement technique, *i.e.* relative à la disponibilité d'alternatives techniques, peut dans tous les cas être amoindrie à la suite d'efforts de recherche. L'exemple de l'agriculture biologique montre que toute culture peut être produite avec peu ou pas de pesticides.

Du point de vue économique, l'élément central demeure la rentabilité relative de l'utilisation préventive des pesticides chimiques. Cette rentabilité est à entendre au sens de la marge brute mais également dans une acception plus élargie. Pour ce qui concerne la rentabilité de la lutte chimique au sens comptable du terme, le point crucial demeure le très bon rapport coût/efficacité des pesticides pour la plupart des cultures. Cette rentabilité semble d'autant plus élevée que les cultures considérées sont soumises à des contraintes fortes en matière de commercialisation. Pour certains fruits et légumes, il semble que la seule alternative actuelle aux modes de production conventionnels semble être le marché des produits de l'« agriculture biologique ». Ce marché offre deux avantages : d'une part un prix rémunérateur, et d'autre part une certaine tolérance quant l'aspect et au délai de conservation des produits.

En élargissant la notion de rentabilité, la comparaison confirme l'avantage des modes de production conventionnels. Ces modes de production sont relativement faciles à mettre en œuvre et, qui plus est, sont enseignés et conseillés de longue date. Les alternatives aux pratiques conventionnelles sont en général plus délicates à utiliser pour les producteurs car, dans l'état actuel des connaissances et de leur diffusion, elles nécessitent d'être conçues au cas par cas. De plus, elles requièrent généralement un pilotage assez fin, ce pilotage pouvant nécessiter des compétences assez fines et un temps de travail conséquent. Enfin, diminuer les niveaux de protection chimique suppose généralement d'accepter certains risques en raison de l'efficacité généralement partielle des alternatives aux pesticides.

8. Adoption des pratiques économes en pesticides

8.1. Déterminants et effets de l'utilisation de pratiques économes en pesticides

C'est probablement dans le contexte de l'analyse des effets de l'adoption de pratiques économes en pesticides que les différences apparaissent entre les résultats des études nord-américaines et européennes. Ce point concerne plus particulièrement les grandes cultures, le secteur de production agricole le plus étudié (Carpentier *et al.*, 2005). La terre étant un intrant plus abondant en Amérique du Nord qu'en Europe Occidentale, les agriculteurs nord-américains ont tendance à utiliser des pratiques

de production plus extensives, *i.e.* avec des rendements objectifs moins élevés. Ceci a deux principales implications. Les agriculteurs nord-américains utilisent moins de pesticides (et d'intrants variables en général) que leurs homologues européens. Les études américaines sur les pratiques économes en pesticides se sont essentiellement concentrées sur les techniques de protection intégrée alors que les études européennes se sont concentrées sur les techniques de la production intégrée. Compte-tenu de l'endogénéité de certains dégâts des ennemis des cultures, il est en effet difficile de diminuer l'utilisation des pesticides lorsqu'on emploie des pratiques visant de hauts rendements.

En 1993, l'USDA, l'EPA et la FDA[14] ont annoncé un objectif de 75% des surfaces en protection intégrée (*Integrated Pest Management*) pour l'agriculture des Etats-Unis. Des mesures d'incitation financières ont été mises en place à partir de 1997. Ce dispositif a permis la mise en œuvre d'importantes collectes de données sur les pratiques des agriculteurs et leur exploitation à travers de nombreuses études empiriques.
Les premières d'entre elles s'appuient sur les travaux précurseurs de David (1969) et visent à définir les caractéristiques des agriculteurs adoptant les techniques de la protection des cultures intégrée (Fernandez-Cornejo et Jans, 1996 ; Fernandez-Cornejo, 1996 et 1998 ; Wiebers *et al.*, 2002 ; Caswell *et al*., 2001). Ces études concernent prioritairement le dépistage. Elles mettent en avant trois facteurs influençant de manière positive l'adoption de ces techniques : la surface de l'exploitation, l'éducation de l'exploitant et l'insertion dans les réseaux de conseil. Les deux derniers déterminants font écho au fait que les techniques alternatives à la lutte chimique préventive sont « intensives » en information et en capital humain. L'effet de la taille de l'exploitation peut révéler deux effets : la disponibilité de l'exploitation pour le pilotage de la mise en œuvre de méthodes relativement complexes ou l'impact de la santé financière de l'exploitation. Les grandes exploitations sont généralement caractérisées par une main d'œuvre abondante et une bonne santé économique. Diederen et al. (2003) montrent que la rentabilité observée des exploitations augmente la probabilité qu'elles aient adopté des pratiques innovantes dans le cas de l'agriculture néerlandaise.

Le second type d'études vise à mettre en évidence les facteurs stimulant le processus de diffusion des techniques de la protection intégrée (Fernandez-Cornejo et Kackmeister, 1996 ; Fernandez-Cornejo et Castaldo, 1998 ; Fuglie et Kascak, 2001). Ces études confirment le rôle de l'éducation des exploitants et le rôle des dépenses publiques de R&D.
Le dernier type d'études vise à évaluer les effets de l'adoption de la protection intégrée sur l'utilisation des pesticides, les rendements et/ou le revenu des agriculteurs. Fernandez-Cornejo et al. (1998) ont synthétisé les résultats obtenus avant 1997 par différentes approches : des comparaisons de résultats expérimentaux, des comparaisons de résultats de simulation, des comparaisons directes des choix d'agriculteurs adoptants et non-adoptants et des mesures économétriques des effets de l'adoption avec correction pour le biais de sélection (Heckman, 1997) des agriculteurs ayant choisi d'adopter.[15] Ces études tendent à montrer que l'adoption des techniques de la protection intégrée tend à accroître les rendements et les revenus (marges brutes) obtenus et tend à diminuer l'utilisation de pesticides, même si ce dernier effet est plus mitigé, le dépistage pouvant induire une augmentation des utilisations de pesticides (pour le coton et le maïs). Les effets obtenus ici sur les rendements et l'utilisation de pesticides tendent à illustrer le caractère relativement « extensif » des pratiques culturales des producteurs nord-américains de grandes cultures. Les études économétriques les plus récentes (Fernandez-Cornejo et Jans, 1996 ; Fernandez-Cornejo, 1996 et 1998 ; Wiebers *et al.*, 2002 ; Caswell *et al*., 2001 ; Yee et Ferguson, 1996) confirment ces résultats : la protection intégrée accroît les utilisations de pesticides et légèrement les rendements en grandes cultures alors qu'elle diminue les

[14] United States Department of Agriculture, Environmental Protection Agency, Food and Drug Administration.
[15] Les résultats de la sous-section précédente montrent par ailleurs que d'une part les agriculteurs qui utilisent ces techniques sont mieux formés, cherchent plus de conseils et bénéficient d'efforts de recherche publique plus importants que les autres et, d'autre part les exploitations où ces techniques sont utilisées sont plus grandes, plus rentables et bénéficient de meilleures conditions climatiques que les autres. Aussi, *ceteris paribus*, les exploitations où les techniques de lutte intégrée sont déjà utilisées sont celles où les résultats des pratiques conventionnelles sont aussi les meilleurs.

utilisations de pesticides et augmente généralement les rendements et le revenu en cultures fruitières (tomates comprises).[16]

Contrairement aux Etats-Unis, l'UE ou la France n'ont pas mis en œuvre des études ou des enquêtes visant à dresser un état des lieux quant à l'utilisation des techniques de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures ou plus généralement quant à l'utilisation des techniques de la production agricole intégrée. En 1986, l'Union Européenne lançait un programme *Competitiveness of Agriculture and Management of Agricultural Resources* (CAMAR) qui portait sur un réseau d'essais menés dans dix pays d'Europe ; ce programme fut relayé par le programme *Agro-industrial research* (AIR). Cependant, ces programmes ne semblent guère avoir essaimé si l'on en juge par les bilans récents effectués à la demande de la Commissions Européenne (Agra CEAS Consulting, 2002). Cette pratique serait utilisée sur moins de 3% de la surface agricole utile européenne. La part des surfaces répertoriées en production intégrée est en général faible, sauf pour quelques Etats-membres, notamment pour l'Autriche et le Danemark, et à degré moindre pour la Grande-Bretagne ou la Suède. Il convient cependant d'être prudent dans l'analyse de ces chiffres. En effet, le terme de production intégrée ne répondant pas à une norme commune dans l'UE, elle regroupe des systèmes qui, dans les faits, peuvent ne pas être équivalents. De même, ne sont répertoriées en tant qu'utilisatrices de ces techniques de la production intégrée que les exploitations qui entrent dans le cadre d'un dispositif officiel (tel que celui des MAE co-financées par l'UE) ou dans le cadre de productions labellisées en tant que telles. Ces chiffres peuvent donc sous-estimer l'utilisation réelle de ces pratiques. Il est à noter que les Etats-membres dont la part des surfaces en production intégrée est élevée sont également ceux dont la part des surfaces en agriculture biologique est la plus importante. Seules la Finlande et l'Italie ont d'importantes surfaces en agriculture biologique sans avoir d'importantes surfaces en production intégrée. En Europe, les principes de la protection phytosanitaire intégrée ne sont véritablement appliqués qu'à quelques cultures de haute rentabilité : arboriculture fruitière, cultures protégées sous serre et viticulture. Mais, dans la majorité des autres cas, on en est encore au stade d'une lutte chimique raisonnée (Van Lenteren *et al*., 1992).

Contrairement aux études américaines, les études européennes concernant les pratiques économes en intrants s'appuient essentiellement sur des résultats expérimentaux (Agra CEAS Consulting, 2002). Il est en effet difficile d'utiliser des résultats d'enquête auprès des agriculteurs pour mesurer les effets et identifier les déterminants de l'utilisation de pratiques peu utilisées. En outre les pratiques étudiées en Europe sont celles de la production agricole intégrée et non celles de la protection intégrée.

De manière générale, les pratiques conventionnelles des producteurs européens de grandes cultures sont relativement intensives (avec des rendements objectifs plus élevés). Les résultats des expérimentations réalisées en grandes cultures dans le cadre des programmes AIR et CAMAR mettent en évidence que, par rapport au système conventionnel, le système de production intégrée conduit à des rendements plus faibles, mais que l'économie d'intrants qu'il permet de réaliser, compense la perte liée à la diminution des rendements (Viaux *et al*., 1994). Ces résultats sont confirmés par des analyses plus récentes. Les résultats d'expérimentations d'itinéraires techniques intégrés en blé tendre sont particulièrement probants pour la France. En combinant le choix de variétés résistantes aux maladies, une réduction de la densité de semis (-40%), de la dose d'azote (-20%), des traitements fongicides (-70%) et une suppression des régulateurs de croissance, on obtient, avec des rendements réduits de 10 à

[16] Une certaine prudence s'impose cependant quant aux interprétations présentées ci-dessus. D'une part, les données utilisées par ces études ne concernent qu'une période limitée. Les infestations des cultures étant variables dans le temps, ces résultats peuvent être spécifiques aux années durant lesquelles ces données ont été recueillies. D'autre part, l'effort des Etats-Unis pour l'utilisation de ces pratiques s'est beaucoup intensifié durant la période dans laquelle les données ont été recueillies. Aussi, l'adoption de certaines pratiques est certainement récente pour bon nombre d'agriculteurs. Leur maîtrise de ces techniques n'est peut-être pas encore suffisante pour exploiter au mieux leurs possibilités. Selon cette logique, les effets bénéfiques de l'utilisation de ces pratiques seraient sous-estimés. Les résultats concernant l'effet de l'utilisation des techniques de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures sur le risque de production et de revenu sont très variables et parfois issus d'approches discutables (Bosch et Pease, 2000). Pourtant, en analysant les études publiées sur le sujet Bosch et Pease (2000) concluent que l'utilisation des techniques qui visent à réduire *ex ante* la pression des déprédateurs sur les cultures ont généralement un effet contre-aléatoire sur les rendements obtenus.

15%, des marges brutes au moins équivalentes à celles des itinéraires techniques conventionnels, sans que leur variabilité soit accrue (Loyce *et al.* 2001). En outre, plus le prix de vente du blé est faible et plus l'intérêt économique de ce type d'itinéraire s'avère grand (Rolland *et al.* 2003). Nolot et Debaeke (2003) obtiennent des résultats similaires pour une étude sur grandes cultures dans la région toulousaine.
Les études recensées par Agra CEAS Consulting (2002) à la demande de la Commission Européenne aboutissent à des conclusions analogues. Ils concernent des pratiques de production combinant à divers degrés : variétés résistantes, réduction des rendements objectifs, fertilisation raisonnée, protection intégrée et rotations culturales (légumineuses, couverture du sol en hiver, …). Dans la plupart des cas, les rendements obtenus en production intégrée sont (légèrement) inférieurs à ceux obtenus en production conventionnelle. Cet effet est compensé par la baisse des coûts de production en pesticides, engrais et semences ce qui conduit à des marges brutes comparables. Ces études rapportent parfois une augmentation du temps de travail et un accroissement de la variabilité des rendements. Mais généralement, ces études mentionnent que les pratiques de la production intégrée sont d'autant plus rentables que le prix du produit est bas. En outre, il convient de noter que pour les études les plus récentes, les choix de pratiques ne sont pas encore nécessairement « optimisés » d'un point de vue économique.
Ce rapport de Agra CEAS Consulting (2002) présente également quelques pratiques utilisées en conditions réelles. Les résultats qualitatifs de ces études sont proches de ceux présentés dans le cas des grandes cultures. Elles montrent que dans ce cas la production intégrée ne modifie ni les rendements ni la qualité des produits. Mais si la production intégrée permet de réduire substantiellement le coût des intrants chimiques, cette diminution de coûts est plus que compensée par l'accroissement des coûts liés au travail et des dépenses en matière d'analyses (des sols, des feuilles, …). Eyre Associates (1997) a comparé les résultats économiques de différentes pratiques utilisées par des agriculteurs : production conventionnelle, production intégrée et production biologique. Ils concernent quatre cas d'étude : le blé dans Schleswig-Holstein (Allemagne), la pomme de terre dans le Flevoland (Pays-Bas), la pomme dans le Trentino (Italie) et la viticulture dans le Bordelais (France). Les résultats économiques sont calculés avec les prix en cours en 1995. Ces chiffres montrent que les systèmes de production intégrée permettent de réduire significativement l'utilisation des pesticides tout en permettant de maintenir des marges brutes comparables à celles obtenues avec des systèmes de production conventionnelle. Généralement, la diminution de rendement constatée est compensée par la baisse des coûts variables. Les systèmes de production intégrée du blé considérés ici sont moins rentables que les systèmes conventionnels. Ils sont définis de manière contraignante vis-à-vis de l'utilisation pesticides et des engrais. Ils sont utilisés en Allemagne grâce à l'octroi de compensations financières. Dans le cas de la vigne, les rendements sont identiques entre les deux systèmes, mais l'économie sur les coûts de protection phytosanitaire (et du matériel associé) obtenu en production intégrée est compensée par un accroissement des coûts de la main d'œuvre salariée.
La production biologique, bien que conduisant à des rendements très inférieurs à ceux obtenus en production conventionnelle, est rentable grâce au prix de vente les agriculteurs biologiques perçoivent pour leurs produits. Les agriculteurs pratiquant l'agriculture biologique vendent leurs produits entre deux et trois fois plus chers que leurs homologues pratiquant la production intégrée ou conventionnelle.[17] Calculées sans ces primes, les marges obtenues en production biologique sont de l'ordre de la moitié de celles obtenues en production conventionnelles. La vigne fait figure d'exception ici puisque le vin biologique n'est vendu en moyenne que 7% plus cher que le vin conventionnel. Le rapport de Eyre et Associates (1997) souligne le rôle du conseil et de la formation des agriculteurs pour l'utilisation des pratiques de la production intégrée ou biologique. De même il met en avant deux freins à l'adoption de ces pratiques : le temps de travail supplémentaire qu'elles requièrent et le risque de production qu'elles induisent.

Cette section s'est pour l'instant concentrée sur les effets et déterminants « économiques » de l'adoption de pratiques économes en pesticides. De plus en plus, les économistes tiennent compte des déterminants non-économiques des décisions des agriculteurs. En ce qui concerne les pesticides, les

[17] Ce qui est certainement permis par un raccourcissement des circuits de commercialisation de ces produits.

travaux des économistes se sont orientés dans deux directions : celle de la santé des agriculteurs et des travailleurs agricoles et celle des attitudes pro-environnementales des agriculteurs.
Par exemple, Antle et Pingali (1994) et Antle *et al.* (1998) mettent en évidence les liens directs entre l'utilisation de pesticides, la santé des travailleurs de l'agriculture et la productivité de ces mêmes travailleurs, aux Philippines et en Equateur. Ils montrent que dans ce cas la réduction de l'utilisation de certains pesticides est une stratégie qui est pleinement justifiée: tant d'un point de vue purement économique (revenu agricole) que du point de vue de la santé des travailleurs agricoles ou du point de vue de l'environnement. Il est cependant difficile de savoir s'il est possible de transposer ces résultats pour les pays développés : les produits utilisés sont différents, les enjeux économiques de l'utilisation des pesticides sont différents pour les travailleurs agricoles et la formation des travailleurs agricole est différente. Dans une logique un peu différente, certains auteurs montrent que les préoccupations des agriculteurs pour leur propre santé ou celle de leurs employés ont un impact sur leurs choix de stratégie de protection phytosanitaire en termes qualitatifs (Hubbell et Carlson, 1998) ou en termes quantitatifs (Harper *et al.*, 1990 ; Harper et Zilberman, 1992).
De même, il est montré que certains agriculteurs sont prêts à sacrifier une partie de leur revenu pour adopter des pratiques plus respectueuses de la protection de l'environnement. Cette attitude altruiste (ou liée à la construction d'une meilleure image du métier d'agriculteur) de certains agriculteurs a été démontrée en Belgique dans le cadre de l'adoption de mesures agri-environnementales (Dupraz *et al.*, 2003). Dans ce cas spécifique, cette attitude pro-environnementale a été mise en évidence aux Etats-Unis (Lohr *et al.*, 1999). Dans une logique similaire, Falconer et Hodge (2001) considèrent que montrer aux agriculteurs les effets bénéfiques sur l'environnement de leurs changements de pratiques est un élément à considérer pour l'acceptabilité des politiques de régulation des pollutions. Des sociologues utilisent également ces arguments pour montrer que les politiques de régulation des pollutions pourraient plus s'appuyer sur le volontariat des agriculteurs qu'elles ne le font dans les pays où ces politiques sont réellement mises en place. Une étude comparant les dynamiques de changement au Danemark et au Pays Bas (Bager et Proost, 1997) tente de discerner ce qui, dans les changements de comportement des agriculteurs, provient des différentes formes de régulation mises en place (réglementations, incitations financières, auto-régulation basée sur la formation et le volontariat) et d'une évolution des valeurs, points de vue et représentations des agriculteurs. Ils montrent, malgré la difficulté d'un tel exercice, que l'importance des modes de régulation volontaire est sous-estimée et que l'efficacité des mesures obligatoires dépend, pour une large part, de leur cohérence avec les premières. Ces résultats indiquent que les agriculteurs ne retourneraient pas forcément à leurs anciennes pratiques si les mesures incitatives étaient levées. Les changements sont durables car ils ont affecté les ressorts internes de la prise de décision (ce que les économistes nomment les préférences des agriculteurs). Ces enquêtes révèlent que si généralement les agriculteurs reconnaissent la nécessité de mesures de régulation législative, ils sont très critiques quant à la manière dont ces mesures sont justifiées et introduites, cela est alors fortement susceptible de freiner le volet de mesures basé sur le volontariat.

Dans tous les cas, les études économiques considérant ces éléments montrent que les effets de l'attitude pro-environnementale sont très variables au sein de la population des agriculteurs. Les éléments environnementaux semblent plus jouer au niveau du choix des pratiques utilisées qu'au niveau des quantités de pesticides utilisées (Lohr *et al.*, 1999). Certains agriculteurs sont prêts à utiliser des pratiques qui diminuent leur revenu, cette perte étant compensée de leur point de vue par la satisfaction d'avoir contribué à la protection de l'environnement. Cette attitude est analogue à celle des consommateurs qui achètent des produits plus chers que les produits conventionnels mais dont la production et/ou la commercialisation est conforme à certaines de leurs valeurs (protection de l'environnement, commerce équitable, …). Cette attitude s'observe particulièrement chez les agriculteurs les plus jeunes et les mieux formés. Aussi, développer la sensibilité environnementale des agriculteurs (et les prévenir quant aux effets négatifs des pesticides sur leur santé, tout au moins leur rappeler) est un autre effet positif d'une politique de formation des agriculteurs. Elle favorise des choix en faveur de l'utilisation de pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ceci dit, une grande majorité des agriculteurs semble peu sensible aux effets environnementaux de leurs choix, comme l'est une grande majorité des consommateurs.

8.2. Mécanismes de l'adoption de pratiques économes en pesticides

L'objectif de la sous-section précédente était d'analyser les résultats des études empiriques concernant les déterminants et les effets de l'utilisation des pratiques économes en pesticides. Ces études sont essentiellement descriptives dans le sens où elles cherchent à mettre en évidence des liens statistiques plus qu'à analyser le comportement des agriculteurs, *i.e.* à retrouver les calculs qui conduisent ces derniers à modifier leurs pratiques. L'objectif de cette section est de présenter l'analyse économique des déterminants de l'adoption des pratiques économes en pesticides. La distinction entre les termes « adoption » et « utilisation » est importante ici. L'adoption est définie ici comme la transition de l'utilisation d'une technologie à l'utilisation d'une autre technologie (de production ici). Le terme « diffusion » est ici réservé à l'analyse agrégée de l'adoption au sein d'une population, le terme adoption étant réservé au niveau individuel.

L'étude des facteurs de l'adoption d'une nouvelle technologie de production n'est intéressante que s'il est avéré que l'utilisation de cette technologie apporte(rait) un plus aux producteurs. Si ça n'était pas le cas, le producteur n'aurait aucun intérêt à utiliser la technologie qui lui est proposée, ce qui règle d'emblée le problème de son adoption. Ces conditions sont suffisantes pour l'utilisation (maîtrisée) des pratiques considérées mais elles ne sont pas suffisantes pour leur adoption. Les caractéristiques de ces pratiques sont telles que leur adoption est relativement difficile pour les agriculteurs. L'objectif de cette section est de présenter l'analyse économique des difficultés de la transition des pratiques de protection phytosanitaires conventionnelles vers des pratiques plus économes en pesticides. Cette analyse permet d'analyser le rôle des pouvoirs publics pour lever les difficultés de cette transition.

Dans tous les cas, l'adoption d'une nouvelle technologie est considérée comme un investissement de long terme. Comme tout investissement, l'adoption d'une nouvelle technologie repose d'abord sur une comparaison des coûts et des bénéfices que cet investissement engendre. Griliches (1957) a été le premier à mettre en évidence empiriquement l'importance des déterminants économiques de l'adoption de nouvelles techniques en étudiant le processus de diffusion du maïs hybride en Iowa. Il a ainsi montré que les agriculteurs qui ont adopté les premiers cette technique sont aussi ceux qui en bénéficiaient le plus. Cependant ce résultat rappelle surtout que le premier déterminant de l'adoption d'une technique est le bénéfice qu'en retire celui qui l'utilise. La forme typique de l'évolution des taux d'utilisation d'une nouvelle technologie est celle d'une sigmoïde ou courbe en « S ». Selon la forme de ces courbes, le taux d'utilisation augmente faiblement à partir du moment où la nouvelle technique est disponible, puis ce taux d'utilisation s'accélère et finit par ralentir à partir du moment où la grande majorité des producteurs utilisent cette nouvelle technologie. Pour ce qui concerne les technologies agricoles et les technologies respectueuses de l'environnement, la principale question que se sont posée les économistes est en rapport avec la relative « lenteur » du processus d'adoption ou de diffusion des nouvelles technologies (Sunding et Zilberman, 2001 ; Jaffee, Newell et Stavins, 2002).
Afin de répondre à cette question, la théorie économique de l'adoption et de la diffusion des nouvelles technologies met en avant deux caractéristiques de cet investissement. Tout d'abord, cet investissement concerne des intrants particuliers : des connaissances spécifiques et de l'information. Ces connaissances et cette information peuvent être diffusées aux producteurs de manière formelle plus ou moins centralisée (*via* des organismes de recherche et de conseil, *via* des GDA, …) et/ou par des échanges informels entre producteurs. Ensuite, les résultats attendus de cet investissement sont hétérogènes, notamment dans le cas des technologies de production agricole. En effet, les effets des techniques de production agricole dépendent des conditions dans lesquelles ces techniques sont utilisées et par qui elles sont utilisées. Aussi, la relative lenteur de l'adoption et, par conséquent, de la diffusion des nouvelles technologies a essentiellement été abordée sous deux angles : celui de la diffusion de l'information et des connaissances nécessaires à l'utilisation des nouvelles technologies et celui de l'hétérogénéité des bénéfices attendus de ces nouvelles technologies.

L'approche basée sur la question de l'information part du principe que la maîtrise d'une nouvelle technologie nécessite une utilisation d'information et de connaissances spécifiques. Or ces éléments se diffusent généralement lentement et leur utilisation est d'autant plus efficace que les agriculteurs disposent d'un niveau de capital humain initial important. Aussi, la vitesse de la diffusion d'une

technologie est naturellement limitée par la vitesse de diffusion de l'information et des connaissances, et par le niveau de capital humain des agriculteurs (expérience et/ou éducation). Cette approche a été à l'origine des premiers modèles de diffusion des nouvelles technologies. Dans ces modèles le processus de diffusion d'une nouvelle technologie est formalisé de manière analogue à celui d'un processus de contagion (Griliches, 1957 ; Stoneman, 1983). De nombreuses études empiriques ont confirmé le rôle de l'information dans le processus de diffusion des technologies de production agricole en montrant que les efforts de recherche et de conseil tendent à accélérer cette diffusion. Ces études illustrent également le rôle fondamental du niveau d'éducation des agriculteurs (Huffman, 2001 ; Sunding et Zilberman, 2001). L'approche mettant en avance l'hétérogénéité des bénéfices attendus de l'utilisation d'une nouvelle technologie a été formalisée en premier lieu par David (1969). Selon cette approche, seuls les producteurs pour qui les coûts de l'adoption de la nouvelle technologie sont inférieurs aux bénéfices (actualisés) attendus de l'utilisation de cette nouvelle technologie adoptent cette dernière. La diffusion de l'information aidant, les bénéfices liés à l'utilisation de cette nouvelle technologie augmentent (les coûts d'investissement et d'utilisation diminuent et la maîtrise des utilisateurs s'accroît avec l'expérience accumulée) ce qui fait que le nombre d'agriculteurs pour qui cette adoption devient rentable augmente progressivement. En fait, tout facteur susceptible :

- de diminuer les coûts liés à l'adoption de la nouvelle technologie,
- d'augmenter les bénéfices liés à l'utilisation de la nouvelle technologie

et/ou :

- de diminuer les bénéfices liés à l'utilisation de l'ancienne technologie

tend à accélérer l'adoption de la nouvelle technologie. Il existerait ainsi généralement une petite proportion de « précurseurs », une grande proportion de « suiveurs » et une petite proportion de « retardataires » (Cochrane, 1979). Selon l'analyse de David (1969), cette typologie suggère une distribution normale ou logistique des bénéfices nets que les producteurs retirent de l'utilisation des nouvelles technologies.[18] De nombreux travaux ont mis en évidence l'importance des conditions pédo-climatiques pour expliquer l'adoption (ou l'utilisation) des pratiques agricoles depuis les travaux de Caswell et Zilberman (1986) sur les techniques d'irrigation de précision (Caswell et Shoemaker, 1993 ; voir la section précédente pour l'adoption de la protection intégrée aux Etats-Unis). La plupart des travaux concernant l'adoption (ou l'utilisation) de technologies agricoles mettent en avant le rôle de l'éducation des agriculteurs, voire de leur disponibilité (Sunding et Zilberman, 2001 ; voir la section précédente pour l'adoption de la protection intégrée aux Etats-Unis). Les approches classiques pour l'analyse de l'adoption et de la diffusion des nouvelles technologies ont cependant plusieurs défauts majeurs dans le présent contexte. En effet, celle de Griliches (1957) postule que la diffusion de l'information et des connaissances suivent un processus de contagion sans chercher à mettre en évidence ni le fonctionnement, ni les déterminants de ce processus. Celle de David (1969) a tendance à négliger les interactions entre producteurs et, surtout, ne distingue pas les déterminants de l'utilisation de la nouvelle technologie de ceux de son adoption.

Les recherches les plus récentes sur la diffusion et l'adoption des nouvelles technologies tentent de corriger ces défauts, principalement en généralisant l'approche de David (1969), *i.e.* en cherchant à définir le plus complètement possible le calcul d'un agriculteur qui considère l'adoption d'une nouvelle technologie de production (Geroski, 2000). Ce type de recherches est abondant dans la littérature théorique depuis l'article fondateur d'Arrow (1962) sur les effets de l'apprentissage. Même si de nombreux travaux théoriques se réfèrent explicitement à la production agricole (*e.g.*, Tsur *et al.*, 1990 ; Lindner *et al.*, 1979 …), leur utilisation empirique pour l'étude de l'adoption des nouvelles technologies de production agricole est plus récente mais se développe rapidement (Sunding et Zilberman, 2001 ; Baerenklau, 2005).

Les technologies de production agricole, notamment celles économes en pesticides, ont des caractéristiques qui rendent les changements de pratiques relativement délicats et coûteux pour les agriculteurs (Marra *et al.*, 2003 ; Pannell *et al*, 2005). Ces études distinguent la phase d'adoption de la phase d'utilisation. Elles insistent toutes sur certaines caractéristiques des innovations « radicales » en

[18] Ou d'autres facteurs, tels que des facteurs sociologiques : certains producteurs sont plus intéressés par les innovations techniques que les autres, …

production agricole. Les effets de ces technologies de production dépendent des lieux où ces technologies sont utilisées. Aussi, ces effets sont incertains *a priori*. Les connaître suppose une phase d'essais et/ou d'apprentissage qui implique une prise de risque plus ou moins importante.

L'adoption d'une nouvelle technologie suppose donc le passage par une phase d'apprentissage (*learning by doing* ou *learning by using*) des effets réels de la technologie qui détermine l'adoption finale ou non de la technologie et qui permet l'ajustement des principes d'action de cette technologie au contexte de l'exploitation considérée. Cette phase d'adaptation s'accompagne de coûts explicites (achat de matériel, de services spécifiques, temps de travail, …) ou implicites (pertes de revenu, aléa de revenu, …). En particulier, l'adoption effective de la nouvelle technologie (*i.e.* sur l'ensemble de l'exploitation ou tout au moins à large échelle) est souvent précédée d'une phase d'acquisition d'information et d'expérimentation (essai/optimisation) plus ou moins coûteuse pour les agriculteurs (Leathers et Smale, 1991 ; Abadi Gahim et Pannell, 1999 ; Marra *et al.*, 2003 ; Abadi Gahim *et al.*, 2005 ; Pannell *et al*, 2005). L'ensemble des coûts précédant l'adoption d'une nouvelle technologie sont, dans une large mesure, irrécupérables. En effet, si la technologie devait *in fine* être abandonnée car non rentable ou peu adaptée à l'exploitation considérée, l'investissement et l'apprentissage liés à cette innovation seraient en grande partie perdus. De ce fait, l'adoption d'une innovation, surtout d'une innovation radicale, peut être considérée comme une prise de risque par les agriculteurs.

Si l'agriculteur a une perception initiale des effets de la nouvelle technologie suffisamment optimiste, il se pose la question de l'acquisition d'informations qui lui permettent de décider d'adopter ou non cette technologie sur des bases plus « solides ». Il peut obtenir cette information de manière passive, *i.e.* par ses voisins, par des organismes de recherches, … ou de manière active, *i.e.* en expérimentant lui-même la nouvelle technologie. Ces deux principales sources d'information sont, tout au moins dans une certaine mesure, substituables. Cependant, étant donnée la nature des technologies économes en intrants l'expérimentation peut être considérée comme nécessaire puisque : les organismes de recherche ou instituts techniques produisent de l'information générique ; deux exploitations voisines peuvent avoir des productions et des systèmes de rotation différents ; … Aussi l'agriculteur doit généralement passer par une phase d'expérimentation qui consiste à adapter les principes d'action des nouvelles technologies au contexte de son exploitation et à considérer que ces principes d'action peuvent donner des résultats plus ou moins différents de ceux publiés et/ou obtenus par ses voisins.
Concernant l'expérimentation de la nouvelle technologie deux questions, intimement liées, se posent : l'expérimentation doit être mise en place sachant qu'elle engage des coûts qui pourront s'avérer perdus si la technologie est *in fine* abandonnée, et si elle est mise en place, quelle forme doit prendre l'expérimentation ? Les réponses qui peuvent être apportées à ces questions sont relativement complexes. Dans les études spécifiques à l'adoption des technologies agricoles, la question de l'expérimentation « optimale » se réduit généralement à celle de la surface consacrée à l'essai de la nouvelle technologie, les agriculteurs révisant leur perception des performance de la nouvelle technologie selon une logique Bayesienne (Tsur *et al.*, 1990 ; Leathers et Smale, 1991 ; Abadi Ghadim et Pannell, 1999 ; Pannell *et al*, 2005).[19] Dans ce contexte l'agriculteur fait face à l'arbitrage suivant : utiliser une grande surface d'essai (et un plan d'expérience adéquat) pour produire rapidement la quantité d'information nécessaire à sa prise de décision finale ou utiliser une surface plus petite afin de réduire les coûts liés à cette expérimentation. L'intérêt de produire rapidement l'information est de bénéficier le plus tôt possible de la nouvelle technologie si cette dernière s'avère rentable. L'intérêt de réduire les surfaces d'essais est de réduire les coûts d'expérimentation de la nouvelle technologie dans le cas où cette dernière s'avère *in fine* moins rentable que la technologie en place. Cependant, même dans ce cas le problème demeure complexe et probablement formalisé selon des modalités éloignées de celles réellement utilisées par les agriculteurs. Mais quelle que soit la structure du problème considéré, ces études posent le problème de l'expérimentation comme celui de l'acquisition d'un signal informatif similaire à celui du dépistage. Dans ce cas le coût du signal informatif est mesuré par

[19] De fait, la question de la forme de l'expérimentation « optimale » est complexe puisqu'elle repose en principe sur des notions statistiques difficiles à manipuler lorsque le problème concerné est lui-même complexe (voir, *e.g.* l'article séminal de Grossman *et al.*, 1977 ou plus récemment Wiedland, 2000).

-

les coûts de l'expérimentation, *i.e.* des coûts directs : temps de travail, analyses, achats de services de conseils, … et des coûts d'opportunité liés à l'abandon de l'ancienne technologie sur une part de la surface de l'exploitation. L'intérêt de l'expérimentation (*i.e.* du signal informatif produit) réside dans le fait que si elle est coûteuse dans un premier temps elle permet de produire de l'information qui permettra de prendre les décisions plus pertinentes dans l'avenir. Aussi le coût subi dans un premier temps doit permettre, soit d'éviter d'adopter la nouvelle technologie si elle s'avère ne pas être rentable, soit de l'adopter sur l'ensemble de l'exploitation si elle s'avère rentable. L'idée est ici que l'information permet à l'agriculteur d'affiner sa perception des performances de la nouvelle technologie et de prendre une décision « finale » plus pertinente.
Il est également intéressant de remarquer que lorsque la surface nécessaire à l'expérimentation est très importante la prise de risque de l'agriculteur est également importante. Ce cas se présente par exemple lors de la conversion à l'agriculture biologique ou lors de la mise en place d'une nouvelle culture pérenne. Dans ce cas, l'aversion face au risque éventuelle de l'agriculteur joue nettement en défaveur de l'expérimentation et, par conséquent, de l'adoption de la nouvelle technologie. Ceci est vraisemblablement une des raisons qui expliquent le fait que les exploitations les plus grandes sont celles où les changements de technologies de production sont les plus fréquents et les plus rapides.

Le concept de prise de risque associée à l'adoption d'une nouvelle pratique renvoie à lui seul à trois notions selon Marra *et al.* (2003). Puisque le risque est lié à un manque d'information, il est important de considérer les sources d'informations disponibles pour l'agriculteur à propos de la nouvelle technologie : les essais mis en place par l'agriculteur lui-même, les essais de ses voisins, les résultats publiés par les instituts techniques, les instituts de recherches, … Dans ce contexte, l'adoption d'une innovation technologique dépend de l'attitude face au risque des agriculteurs que cette attitude soit liée à leurs préférences face au risque (aversion) ou aux contraintes auxquelles ils font face (contraintes financières, contraintes d'alimentation des cheptels, …). Enfin, la méconnaissance des performances réelles de la nouvelle technologie implique que l'agriculteur fait face à une incertitude au sens économique du terme. La notion d'ambiguïté peut également être mobilisée ici, tout au moins dans une certaine mesure. Un agriculteur expérimenté est capable de quantifier l'effet des aléas climatiques sur ses cultures, en ce sens l'aléa climatique est un risque pour lui, *i.e.* relevant d'une évaluation objective du risque au sens de Von Neuman-Morgenstern (*e.g.* Laffont, 1991a). En revanche, il est difficile pour un agriculteur envisageant l'utilisation d'une nouvelle technologie de quantifier de manière « objective » les performances à attendre de cette technologie. En ce sens, l'aléa induit par l'adoption d'une nouvelle technologie constitue une incertitude pour lui. Son évaluation des effets potentiels de cette nouvelle technologie dépend plus de sa perception subjective de ces effets que d'une quantification objective (évaluation subjective du risque au sens de Savage, voir *e.g.* Laffont, 1991a). La perception par les agriculteurs des effets de l'utilisation de la nouvelle technologie peut différer sensiblement de celle des experts ayant travaillé sur cette technologie. Or, la perception initiale par les agriculteurs des performances attendus de la nouvelle technologie est déterminante. En effet, dans une logique Bayesienne elle conditionne toutes les décisions des agriculteurs puisqu'elle lui sert à quantifier ce qu'il peut attendre de cette technologie une fois qu'il la maîtrisera, à quantifier le coût de l'expérimentation de cette technologie et à quantifier l'intérêt à attendre des informations qu'il peut espérer des sources externes à son expérimentation.
De cette perception dépendra sa décision d'essayer ou non cette nouvelle technologie, d'attendre plus d'information avant de franchir le pas, voire même de s'intéresser ou non à cette innovation. La perception qu'a l'agriculteur de la nouvelle technologie traduit à la fois l'information (objective) dont il dispose (cette dernière pouvant évoluer dans le temps) et sa manière d'utiliser cette information. Les résultats de Pannell *et al.* (2005) illustrent cette idée dans le cas de l'adoption d'une nouvelle culture en Australie. Quatre études américaines tendent à montrer que dans l'adoption des techniques la lutte intégrée est limitée parce que les agriculteurs n'en connaissent pas bien les performances (Pingali et Carlson, 1985 ; Musser *et al.*, 1986 ; Haneman et Farnsworth, 1991 ; Feather et Amacher, 1994). A l'exception de celle de Musser *et al*. (1986), ces études montrent que les agriculteurs qui adoptent les techniques de la lutte intégrée sont aussi ceux qui ont les perceptions les plus optimistes de leurs effets, en terme d'espérance et de risque de revenu. En France, beaucoup d'agriculteurs n'ont que l'expérience de la lutte chimique préventive contre les ennemis des cultures. Dès lors, ils pourraient avoir des difficultés pour évaluer correctement les risques d'infestation de leurs parcelles (puisqu'ils

ont tendance à les éliminer de manière préventive) ou plus généralement les effets potentiels d'autres pratiques culturales que les pratiques conventionnelles.[20]
De ce point de vue, mettre au point une nouvelle technologie de production pertinente d'un point de vue économique est nécessaire pour que cette technologie soit adoptée mais n'est pas suffisant. Il est également nécessaire de diffuser l'information concernant les performances de cette nouvelle technologie. La diffusion de cette information a deux effets sur les décisions des agriculteurs. Elle permet d'éliminer le biais (sur l'espérance perçue) éventuel des perceptions (pessimistes ou optimistes) des agriculteurs dans l'évaluation de ces technologies. Cette diffusion de l'information permet également d'éliminer les effets de l'incertitude (en variabilité perçue) sur le comportement des agriculteurs. Le rôle de l'Etat est ici fondamental dans la mesure où l'information considérée est un bien public que le secteur privé n'est pas incité à produire.

Puisque l'expérimentation de la nouvelle technologie peut s'avérer coûteuse et risquée, l'agriculteur peut chercher à se procurer de l'information *via* d'autres sources. Lorsqu'il expérimente ou adopte une nouvelle technologie, un agriculteur produit de l'information pour lui-même mais aussi pour les agriculteurs dont les exploitations sont comparables, notamment ses voisins. Cette information peut parvenir aux autres agriculteurs de manière informelle (observations, échanges verbaux) ou dans des cadres formels (essais organisés par diverses institutions, publications techniques ou scientifiques, …). Ces échanges d'information (*learning by others*) constituent une des sources les plus fréquemment citées de la diffusion des technologies de production agricole (Sunding et Zilberman, 2001 ; Bandiera et Rasul, 2006). De fait, ils sont à l'origine d'opportunités de coordination pour l'expérimentation et l'adoption de nouvelles technologies. De fait, cette opportunité est exploitée par des structures telles que les Groupes de Développement Agricole, les Chambres d'Agriculture, les Instituts techniques, …). Cependant, en l'absence de coordination, cette propriété de l'information produite par l'expérimentation et l'adoption des nouvelles technologies peut être à l'origine de comportements stratégiques de la part des agriculteurs. Certains agriculteurs peuvent adopter un comportement similaire à celui d'un passager clandestin : ils attendent que leurs voisins adoptent ou expérimentent les nouvelles technologies de production. Ceci leur permet de réduire leurs propres coûts d'apprentissage. Le problème est ici que si tous les agriculteurs réagissent de cette manière (ce qui est somme toute rationnel) l'adoption de ces nouvelles pratiques peut être très lente. Du point de vue de la théorie économique, ce phénomène tient à ce que l'information produite par l'adoption ou l'expérimentation d'un agriculteur possède des caractéristiques de bien public dans le sens où elle peut bénéficier simultanément à plusieurs agriculteurs sans que son producteur n'en pâtisse. Or un des phénomènes économiques essentiels liés aux biens publics est que ces biens sont produits en quantités généralement insuffisantes si leur production n'est pas coordonnée par une instance agissant dans l'intérêt de l'ensemble des agents concernés. Les effets néfastes de cette absence de coordination sont difficiles à mettre en évidence et à quantifier d'un point de vue empirique (Manski, 1993a et 1993b). Ces difficultés proviennent de problèmes d'identification dus à ce que ces effets du partage de l'information se confondent avec des effets d'imitation (Banerjee, 1994 ; Baerenklau, 2005) et les effets d'éléments communs à des exploitations voisines. Néanmoins, certaines études empiriques montrent que l'absence de coordination dans l'apprentissage des effets des nouvelles technologies de production tend à ralentir significativement l'adoption de ces technologies. Foster et Rosenweig (1995) obtiennent ce type de résultats pour l'adoption de variétés productives de riz en Inde, Besley et Case (1993, 1994) pour l'adoption de variétés productives de coton également en Inde et Conley et Udry (2001, 2003) pour l'adoption de nouvelles pratiques de fertilisations par des producteurs d'ananas ghanéens. D'un point de vue qualitatif, Baerenklau (2005) obtient les mêmes résultats dans le

[20] Estimer les effets de l'incertitude sur les choix des agriculteurs est assez délicat. En effet, il est difficile de distinguer dans les choix des agriculteurs ce qui est dû à l'incertitude (perception subjective des risques) de ce qui est dû à l'attitude face au risque. Du point de vue des choix de politiques de régulation de l'utilisation des pesticides, cette question est très importante. En effet, l'aversion face au risque est une caractéristique des préférences des agriculteurs et, théoriquement, ne peut pas être modifiée. En revanche, il est possible d'améliorer les perceptions des agriculteurs mettant en place des programmes de formation (Mumford, 1981; Musser *et al.*, 1986) ou en diffusant des informations qui leur permettent de réviser leur perception des risques (Farnsworth et Moffitt, 1984; Feather et Amacher, 1994). En effet, un agriculteur peut refuser d'adopter une nouvelle technologie uniquement parce qu'il anticipe à tort que cette technologie n'a aucun intérêt pour lui.

cas de l'adoption de pratiques de nutrition animale dans le Wisconsin.[21] Dans les pays comme la France, *i.e.* où le conseil agricole est relativement développé, il a *priori* difficile d'évaluer l'importance des bénéfices liés au renforcement des structures de coordination de l'expérimentation et de l'adoption des agriculteurs.

8.3. Adoption de pratiques économes en pesticides et intervention publique

Distinguer la phase d'adoption de celle de l'utilisation, « en régime de croisière » d'une nouvelle technologie s'avère être essentiel pour ce qui concerne l'analyse des effets et donc de l'intérêt de l'intervention publique. Mais si l'adoption précède chronologiquement l'utilisation, les effets économiques de l'utilisation sont considérés par le producteur au moment où il envisage l'adoption. Aussi, il est peu utile de stimuler l'adoption d'une pratique qui ne procure aucun bénéfice lorsqu'elle est utilisée. Le premier déterminant de l'adoption d'une technique est le bénéfice qu'en retire celui qui l'utilise.

Compte-tenu des analyses précédentes, il apparaît que les pouvoirs publics peuvent agir (dans l'intérêt public) pour stimuler l'adoption de nouvelles technologies telles que les pratiques économes en pesticides en intervenant sur les processus de production et de diffusion de l'information auprès des agriculteurs. En effet, il est possible qu'une innovation qui s'avèrerait rentable pour les agriculteurs dès lors qu'ils la maîtriseraient ne soit adoptée que très lentement (voire très peu). L'Etat peut alors intervenir pour :

- améliorer la perception des performances des innovations technologiques par les agriculteurs (élimination des biais des perceptions, réduction de l'incertitude),
- stimuler la mise en place des procédures de test ou d'expérimentation des innovations technologiques,
- coordonner la production et l'échange d'informations entre agriculteurs afin de stimuler leur apprentissage des innovations technologiques.

Dans ce contexte, l'Etat peut utiliser des subventions pour l'adoption (et non pour l'utilisation) des innovations ou agir directement sur l'information (Baerenklau, 2005 ; Jaffee *et al.*, 2002 et 2003 ; Stoneman et David, 1985 ; Shampine, 1998). Il convient cependant de remarquer que les mesures présentées ici visent surtout à accélérer le processus d'adoption des innovations, ce qui suppose que ces innovations seraient adoptées sans problème par les agriculteurs s'ils les maîtrisaient parfaitement. A ce propos Shampine (1998) remarque d'ailleurs que les innovations qui procurent des bénéfices évidents aux agriculteurs sont généralement adoptées rapidement par les agriculteurs sans intervention de l'Etat comme cela a été le cas lors de la Révolution Verte en Inde (voir les études de Foster et Rosenweig (1995) et de Besley et Case (1993, 1995)). Dans la même logique, Pannell *et al* (2005) soulignent que les fonds publics sont mieux utilisés lorsqu'ils financent la recherche agronomique que lorsqu'ils servent à subventionner l'utilisation ou à stimuler l'adoption d'une technologie qui intéresse peu les agriculteurs. Comme cela a été vu précédemment, la diffusion des résultats des essais agronomiques des nouvelles technologies est essentiel pour stimuler les processus d'adoption des innovations en production agricole, notamment quand il s'agit de changements de pratiques radicaux. Cette diffusion d'information modifie la manière dont les agriculteurs perçoivent les performances des innovations, ce qui conditionne toutes leurs décisions ultérieures, à commencer par celle qui consiste à se renseigner à propos de ces innovations. Cette diffusion peut utiliser des supports écrits (revues techniques, magazines, revues scientifiques, …) ou s'appuyer sur des opérations de démonstration sur champ.

Verser des subventions pour l'adoption d'innovations présente deux intérêts essentiels. Le premier est de stimuler l'expérimentation et l'adoption des agriculteurs qui joueront le rôle de précurseurs dans le processus de diffusion de ces innovations. L'idée est ici d'aider les producteurs dans leur phase d'apprentissage, ce qui favorise l'adoption de l'innovation des agriculteurs aidés et l'adoption de leurs voisins, de manière à amorcer le processus de diffusion. Ces subventions peuvent être interprétées

[21] Shampine (1998) propose un modèle simple pour l'évaluation de ces effets.

comme le financement d'un bien public. Ces subventions peuvent être utilisées dans des logiques similaires à celles des aides transitoires à la conversion à l'agriculture biologique, … Lorsque les agriculteurs sont averses face au risque ou font face à des contraintes particulières, ces subventions permettent de compenser en partie la prise de risque financière associée à l'adoption de la nouvelle technologie. Il est important de noter que ces subventions ne doivent être que transitoires. Elles doivent servir à favoriser l'adoption et non à favoriser l'utilisation. Lorsque l'innovation apporte un bénéfice aux agriculteurs, ces derniers refusent ou retardent son adoption si son apprentissage est coûteux en matière d'expérimentation ou de risque. Dans ce cas, accorder des subventions relativement importantes aux adoptants précurseurs sur une courte période (celle correspondant à la durée de la phase d'apprentissage) s'avère plus efficace que d'accorder des subventions limitées sur longue période (Baerenklau, 2005). En outre, pour les innovations qui se diffusent facilement, ces subventions sont surtout utiles au début du processus de diffusion de l'innovation. L'aide au financement du fonctionnement de structures tels que les GDA produit des effets similaires à ceux des subventions présentées ci-dessus. Mais, étant ciblée sur la question de la coordination des comportements des agriculteurs, ces aides peuvent également être utilisées pour la gestion collective des populations d'espèces invasives, des phénomènes de résistance des déprédateurs susceptibles de se déplacer entre les exploitations, … (Clark et Carlson, 1990 ; Wilson et Tisdell, 2001).

Les pouvoirs publics peuvent également susciter l'intérêt de nouvelles technologies pour les producteurs de deux façons : en « pénalisant » l'ancienne ou en « favorisant » les nouvelles.
Pour ce qui concerne les pratiques agricoles économes en intrants chimiques, la seconde solution a été adoptée par la plupart des pays ayant eu une politique active dans ce domaine. Schématiquement, les pouvoirs publics proposent des contrats aux agriculteurs. Le cahier des charges de ces contrats stipulent l'ensemble de ce que les agriculteurs doivent mettre en œuvre. Le contrat définit le montant de la subvention que les agriculteurs reçoivent pour être incités à utiliser la technologie voulue. Enfin, les termes du contrat définissent également la sanction encourue par les agriculteurs lorsqu'ils ne respectent pas les termes du contrat qu'ils ont signé.
Plusieurs points posent problème en pratique dans le cas des techniques économes en pesticides. Il est difficile de fixer de manière efficace ce que les agriculteurs doivent faire. Les choix (de quantités d'intrants, rotations, …) les plus efficaces d'un point de vue économique dépendent des exploitations (conditions pédo-climatiques, des contraintes de temps des exploitants, …) voire du contexte spécifique de l'année en cours. Or les subventions à verser aux agriculteurs et la vérification du respect du contrat doivent en principe dépendre de ce cahier des charges. Une solution consiste alors à définir un cahier des charges rigide, homogène et simple à vérifier. Ce cahier des charges doit être accompagné de subventions d'autant plus importantes qu'il est contraignant, tout au moins s'il est décidé que la technologie doit être largement adoptée. L'autre solution consiste à définir un cahier des charges relativement souple (de « bonnes pratiques ») mais difficile (voire impossible) à vérifier, ce qui se fait au détriment de l'incitation au respect du contrat. Cette solution est très critiquée par la Cour des Comptes Européenne (2005).

Une intervention de l'Etat fondée sur une politique active de recherche agronomique et de taxation des intrants chimiques a, en comparaison, plusieurs avantages. Elle économise les fonds publics destinés au fonctionnement du système de conception/suivi/contrôle/sanction des contrats d'utilisation de la nouvelle technologie. En effet, des intrants chimiques onéreux créent une incitation incontournable à l'utilisation de pratiques économes dans ces intrants. Dans ce cas les agriculteurs sont demandeurs des nouvelles technologies et non simplement attirés par des subventions versées pour l'utilisation d'une technologie par ailleurs peu intéressante. Cette politique économise une large part du coût de la spécification de contrats complexes. Elle laisse aux agriculteurs le soin de définir eux-mêmes les pratiques qui leur semblent les plus adaptées, ce qui est un gage d'efficacité. Ensuite elle est cohérente dans la mesure où d'une part, elle incite les agriculteurs à se tourner vers des pratiques économes en intrants chimiques et d'autre part leur offre les solutions techniques appropriées. Enfin, elle n'exclut pas que des compensations (des effets financiers de la taxation) puissent être versées aux agriculteurs. Ces compensations doivent cependant ne pas interférer avec les choix productifs des agriculteurs. L'intervention publique peut également jouer un rôle au niveau du coût spécifique de l'utilisation de la

nouvelle technologie, que ce soit en matière d'information ou de capital humain. En effet, ce coût est très lié aux conseils reçus par les agriculteurs et aux outils nécessaires au pilotage des technologies.

La discussion précédente souligne l'importance du contexte économique dans la volonté d'utiliser une nouvelle technologie. Un producteur ne décidera de s'engager dans le processus d'adoption que s'il anticipe que l'utilisation de la nouvelle technologie sera plus rentable que l'ancienne. Le rôle des anticipations est ici essentiel, notamment pour ce qui concerne l'intervention publique. Pour ce qui concerne l'adoption de pratiques économes en pesticides, il est clair que la perspective d'une augmentation importante du coût de la lutte chimique devrait stimuler l'adoption de pratiques permettant de diminuer ce coût. De plus, le décalage entre la phase d'investissement dans la nouvelle technologie et celle de l'augmentation du coût de la lutte chimique permet aux producteurs de ne pas subir en même temps les coûts de cet investissement et ceux de l'accroissement des prix des pesticides. Lorsque la nouvelle technologie s'avère plus risquée que l'ancienne en utilisation maîtrisée, les questions relatives à l'attitude face au risque des adoptants potentiels entrent en ligne de compte. Bien que potentiellement important, cet aspect est rarement abordé dans les modèles d'adoption de technologie.

9. Choix des mesures de politique : atteindre les objectifs à coût minimum

Peu d'études considèrent le problème de la régulation des pollutions par les pesticides en tenant compte de ses spécificités et en le traitant dans sa globalité.
La plupart des études spécifiques sur la question des pesticides analysent un point particulier (gestion des phénomènes de résistance, régulation dans un bassin versant par des approches contractuelles, adoption de certaines pratiques, …).
De même, la plupart des études publiées analysant la régulation des pollutions à grande échelle concernent les polluants industriels, *i.e.* des problèmes ne concernant qu'un nombre limité de firmes, que des polluants homogènes et dans la plupart des cas des pollutions mesurées par des concentrations ambiantes (gaz à effets de serre, concentrations de polluants dans une rivière, …).

L'abondante littérature sur la régulation des pollutions d'origine agricole, ou la régulation des pollutions diffuses en général,[22] permet de fait une analyse appliquée au cas des pesticides. La plupart des articles publiés dans ce domaine sont focalisés sur l'analyse de cas spécifiques, visant à comparer les performances d'instruments de régulation d'un point de vue théorique ou à analyser l'impact d'instruments de régulation sur les choix de production effectués sur un site donné, généralement un bassin versant. Les politiques du secteur agricole sont étudiées plus spécifiquement par Just *et al.* (1982, 2002) et les politiques environnementales touchant le secteur agricole par Carlson *et al.* (1993) et Lichtenberg (2002). Les analyses à l'échelle d'un pays ou d'un groupe de pays ont essentiellement utilisé des modèles économétriques de demande d'intrants et d'offre de produits agricoles (*e.g.*, Morisson Paul *et al*. 2002) sur séries temporelles ou des modèles d'équilibre général calculable (*e.g.*, Bovenberg et Goulder, 2002 pour une analyse générale). Ces études se focalisent alors essentiellement sur l'analyse des effets de politiques de taxation.

Aussi définir une politique de régulation des pollutions par les pesticides revient à mobiliser les résultats obtenus de différentes parties des recherches en économie agricole et des recherches en économie de l'environnement pour les appliquer dans un cas spécifique.

Par rapport aux cas généralement étudiés, les pesticides ont plusieurs spécificités importantes :

[22] Définir la forme des instruments que les pouvoirs publics doivent mettre en œuvre afin d'atteindre un objectif donné au moindre coût est un des principaux objets de recherches des micro-économistes de l'économie publique (Laffont, 1991 ; Salanié, 1998), notamment ceux spécialisés en l'économie de l'environnement (Helfand, Berck and Maull, 2003). Les fondements essentiels des politiques de régulation environnementale sont présentés par Baumol et Oates (1988), Bonnieux et Desaigues (1998), Kolstadt (2000) ou Bontems et Rotillon (2003). Ses développements théoriques récents sont exposés dans les articles de synthèse réunis par Mäler et Vincent (2003).

- Les pesticides sont des produits hétérogènes.
- Les caractéristiques des principaux utilisateurs de pesticides sont très hétérogènes.
- Les dommages liés aux pollutions par les pesticides concernent à la fois l'environnement naturel et la santé humaine. Les pesticides peuvent être dommageables à la santé humaine *via* les produits agricoles, *via* l'eau voire *via* l'air (essentiellement pour les agriculteurs).
- Les dommages environnementaux dépendent de l'écotoxicité des produits utilisés, des quantités des pesticides utilisés, des conditions dans lesquelles ces produits sont utilisés et des lieux où ces produits sont utilisés.
- Les dommages sur la santé humaine dépendent de la toxicité des produits utilisés, de la concentration de ces produits dans les aliments ou dans l'eau et des quantités d'eau et de produits ingérés.

Ces spécificités font de la régulation des pesticides un problème relativement complexe car elle doit tenir compte de plusieurs sources d'hétérogénéité : celle de la sensibilité des conflits d'usage de l'environnement, celle de pesticides eux-mêmes, celle des secteurs de la production agricole, ...

Définir une politique de régulation efficace d'un point de vue économique, *i.e.* permettant d'atteindre des objectifs environnementaux donnés au moindre coût pour la société, repose sur quelques grands principes généraux. L'application de ces principes permet de dresser les contours d'une politique efficace de régulation des pollutions par les pesticides.

9.1. Définir des objectifs modulés et compatibles

Les choix des objectifs de régulation des pollutions des pouvoirs doivent, dans la mesure du possible, reposer sur une analyse similaire à celle d'une analyse coût/bénéfice standard. Ceci implique qu'en principe les objectifs de l'Etat devraient être modulés en fonction des conditions spécifiques à chaque localisation géographique. Par exemple, toutes choses égales par ailleurs, les objectifs de réduction des pollutions devraient être plus ambitieux dans les zones sensibles à l'utilisation des pesticides : zones écologiquement fragiles (ce qui rejoint l'idée des zones Natura 2000), zones de collecte d'eau potable (ce qui rejoint la Directive Cadre Eau), zones où les activités humaines sont sensibles aux pollutions par les pesticides (zones de production aquacole, zones périurbaines, …).

Bien entendu les pouvoirs publics peuvent avoir d'autres objectifs que la réduction des effets des pollutions. Les autres objectifs peuvent concerner le revenu agricole (ou le nombre d'agriculteur), le niveau de la production agricole, les finances publiques, … Il convient que ces objectifs soient compatibles. Par exemple, réduire les effets des pollutions sans modifier le revenu agricole et sans accroître les dépenses publiques est illusoire. Réduire les effets des pollutions sans modifier le revenu agricole est théoriquement possible. Cependant dans ce cas, un accroissement des dépenses publiques est nécessaire. Ceci ne pose pas de problème outre mesure si les objectifs fixés le sont dans l'intérêt général puisque dans ce cas l'accroissement des dépenses publiques est compensé par la réduction des coûts liés aux effets des pollutions qui, si elle est difficilement évaluable, n'en est pas moins réelle.

Ensuite, il est également important de noter que les contraintes imposées dans le choix des mesures de régulation mobilisées pour atteindre les objectifs fixés se traduisent généralement par une hausse du coût social de cette régulation. Les pouvoirs publics peuvent par exemple décider d'exclure l'utilisation d'instruments spécifiques (*e.g.* les taxes sur le prix des pesticides) pour des raisons d'acceptabilité politique. Si cet instrument de régulation apparaît comme optimal d'un point de vue économique, s'en priver oblige à se reporter sur un choix d'instrument sous-optimal, donc coûteux d'un point de vue social (soit au niveau du budget de l'Etat et donc des contribuables, soit au niveau des coûts subis par d'autres agents économiques).

9.2. Utiliser une combinaison d'instruments de régulation

Dans le cas de la régulation des pollutions par les pesticides, notamment à l'échelle d'un pays comme la France, il semble nécessaire d'utiliser une combinaison d'instruments de régulation (normes, taxes, subventions, …). L'utilisation d'une combinaison d'instruments a pour intérêt de permettre :

- De résoudre un problème géographiquement hétérogène, soit en adaptant le niveau des instruments localement, soit en n'utilisant certains instruments que dans des cas spécifiques.
- De tirer partie des avantages respectifs de chacun des instruments disponibles, certains étant plus indiqués que d'autres en fonction des situations considérées (intervention globale, intervention locale, …).

En outre, les combinaisons d'instruments sont généralement nécessaires pour pouvoir atteindre plusieurs objectifs (réduction des pollutions, maintien du revenu des agriculteurs, …). Poursuivre plusieurs objectifs au moindre coût social requiert généralement l'utilisation d'un instrument par objectif.

9.3. Quelques grands principes pour choisir des instruments efficaces

Dans l'optique de la définition de politiques optimales de régulation des pollutions, l'analyse économique s'appuie sur quelques grands principes.

Agir aussi directement que possible sur la source du problème

Ce principe implique que la régulation doit chercher à agir sur le niveau de toxicité/écotoxicité des produits utilisés.

Sinon, en partant du principe que toute molécule active utilisée est potentiellement polluante (qu'elle aille dans l'environnement naturel ou qu'elle contamine le produit agricole), ce principe suppose que la régulation doit avoir pour objectif la réduction de l'utilisation des pesticides. Les agriculteurs étant avant tout des producteurs, ils utilisent les pesticides parce que ces intrants leur sont rentables, relativement aux alternatives possibles. Ceci explique pourquoi les économistes privilégient les mesures d'incitation économique, la plus directe étant la taxation « à la Pigou ».

Ceci dit, les pesticides sont d'autant plus rentables qu'ils sont utilisés dans des systèmes de production intensive. La taxation Pigouvienne est en théorie suffisamment efficace pour modifier les pratiques. Il suffit en fait d'instaurer des niveaux de taxation suffisants. En pratique le problème est cependant plus complexe, pour des raisons politiques, mais également en termes d'efficacité économique. Puisqu'ils utilisent essentiellement des approches en statique comparative, les économistes ont souvent tendance à négliger les phases de transition permettant de faciliter le passage d'un équilibre à un autre. De même, ils focalisent généralement leurs analyses sur la poursuite d'un objectif unique. Si la taxation fait nécessairement partie de l'ensemble des instruments à mobiliser, elle n'est pas le seul.

Adapter les modalités de l'intervention à l'objectif fixé

Schématiquement, les instruments de régulation utilisés doivent être d'autant plus coercitifs ou incitatifs que l'objectif fixé est prioritaire. Par exemple, les objectifs en matière de santé humaine justifient des principes d'intervention relativement « rigides » au niveau de la toxicité des produits utilisés. De même, ceci suppose, soit d'adapter le niveau de l'instrument envisagé (niveau de la taxe, niveau de la norme, caractéristiques des cahiers des charges d'un contrat agri-environnemental, …) à l'objectif fixé, soit d'utiliser des instruments adaptés à chaque situation.

Orienter les choix des agriculteurs plutôt que les contraindre

L'idée est ici que les agriculteurs connaissent mieux que quiconque les solutions, en particulier techniques, adaptées à leur exploitation ou à leurs propres préférences. Définir une solution adaptée à chaque agriculteur nécessiterait une masse d'information très coûteuse à obtenir et à exploiter. Cette logique tend à exclure l'utilisation à grande échelle d'instruments tels que les quotas d'utilisation de pesticides (régulation par les quantités à caractère obligatoire) ou les contrats pour utilisation de bonnes pratiques (régulation par les quantités à caractère volontaire). L'élaboration de tels instruments est très coûteuse si ces instruments sont définis au cas par cas. Définis de manière homogène, ils sont inutilement contraignants pour certains agriculteurs et n'ont aucun intérêt pour d'autres.

Considérer les coûts administratifs des mesures envisagées

L'exemple précédent montre que le coût d'élaboration de certaines mesures de régulation peut être très élevé. D'autres coûts administratifs supportés par l'Etat doivent également être considérés : coûts

d'administration des dossiers, coûts de diffusion de l'information, … Parmi ces coûts, il convient de mettre en avant les coûts de contrôle du respect des normes (ou quotas) édictées ou des cahiers des charges des contrats adoptés.
Ce critère de choix des instruments de politique a longtemps été négligé, tout au moins implicitement et principalement par les économistes néo-classiques. Il a tendance à devenir de plus en plus décisif, par exemple dans la logique de l'évaluation de l'efficacité des mesures de politique publique mise en place par l'UE sous la responsabilité de la Cour des Comptes Européenne. L'économie institutionnelle, à travers la notion de coûts de transaction, a permis de montrer l'importance des coûts d'administration des mesures.

Considérer les effets de long terme des instruments de régulation
Certains instruments de régulation peuvent avoir des effets incitatifs de court ou moyen terme identiques mais des effets de long terme très différents. Ce point rejoint en partie celui de la flexibilité des choix des agents économiques concernés. Par exemple, dès lors qu'ils respectent les termes des contrats qu'ils ont signés, les agriculteurs n'ont plus d'incitations à réduire leurs utilisations de pesticides. En revanche, si une taxe permet à court/moyen terme d'obtenir la même réduction des utilisations de pesticides, les effets incitatifs de cette taxe continuent à agir sur le long terme : tant au niveau de l'utilisation des pesticides qu'au niveau de l'offre de pesticides ou de l'offre de conseil à la réduction de l'utilisation de pesticides.

9.4. Agir à long terme et anticiper

Enfin, plus l'objectif de réduction de l'utilisation des pesticides est élevé, plus il est nécessaire d'envisager des politiques de long terme. Il est en effet important de laisser le temps aux différents agents concernés (agriculteurs, distributeurs et producteurs de pesticides, organismes techniques, organismes de recherche, services de conseil, …) de trouver les meilleures solutions aux questions posées. Dans cette logique, la politique de régulation doit être mise en place :

- progressivement afin de ne pas pénaliser inutilement les agents dont le comportement est contraint

et :

- en annonçant dès le début son évolution future afin d'envoyer un message clair (et crédible) pour orienter les comportements d'anticipation.

Par exemple, s'il est décidé de déclarer un bassin versant comme zone où l'utilisation des pesticides est interdite, il est nécessaire d'annoncer que cette interdiction prendra effet à un horizon assez éloigné. Ceci a pour intérêt de laisser le temps aux agriculteurs et à leurs conseillers d'adapter progressivement leurs pratiques sans subir de plein fouet les effets de cette interdiction.

10. En guise de synthèse : une politique « pesticides » pragmatique, l'exemple danois

La politique danoise vise à répondre à des objectifs ambitieux en matière de réduction des pollutions par les pesticides. Elle est articulée autour de la procédure d'homologation des pesticides et de la mise en place de taxes incitatives sur le prix des pesticides qui permettent d'atteindre les objectifs généraux *a minima* au moindre coût administratif. Elle se décline ensuite autour d'une politique active de recherche, de développement et de conseil visant à offrir aux agriculteurs les moyens techniques de diminuer leurs utilisations de pesticides sans trop pénaliser leurs rendements et donc leurs marges.
Enfin, cette politique est complétée par des instruments pouvant être utilisés pour résoudre des problèmes particulièrement aigus localement.

Le système de taxation est un élément central de cette politique car les taxes sur les pesticides jouent le rôle d'éperon pour la plupart des autres instruments utilisés : les agriculteurs cherchent à adopter des pratiques d'autant plus économes en pesticides que ces intrants sont onéreux, ils sont donc demandeurs de conseils et de formations. De même, ces taxes rendent moins coûteuses pour le budget de l'Etat les subventions à verser pour utilisation de bonnes pratiques et les interdictions d'utilisation des pesticides moins pénalisantes pour les agriculteurs qui y sont soumis.

Ce schéma de politique de régulation n'est évidemment pas le seul qui puisse être utilisé pour la réduction de l'utilisation des pesticides, mais il possède de bonnes propriétés quant à son efficacité économique, *i.e.* dans une perspective coût/efficacité. En outre, il peut être facilement adapté à des objectifs moins ambitieux. Le niveau des taxes peut être adapté, les taxes peuvent n'affecter que le prix de certains pesticides, …

10.1. Mesures de fond

Si le problème des pollutions par les pesticides est jugé sérieux de manière générale (*i.e.* important quelles que soient les régions considérées et/ou en terme de santé publique), alors il convient d'utiliser des instruments aisément mobilisables à grande échelle. Trois types d'instruments peuvent être utilisés dans ce sens.

Intervenir sur la toxicité et l'écotoxicité des produits
La procédure d'homologation des produits phytosanitaires utilisés est un instrument réglementaire unanimement reconnu comme nécessaire afin d'agir sur la qualité des produits utilisés, même si les modalités de son utilisation sont parfois discutées. Le rôle de cette procédure est fondamental pour le contrôle de la toxicité/écotoxicité des produits mis en marché.
Cependant, le renforcement récent des critères d'écotoxicité a eu pour effet d'accroître significativement le coût de la mise en marché des pesticides. Il est par exemple montré que les brevets récemment déposés concernent essentiellement des cultures à gros marchés. Ceci peut poser la question du financement public de la recherche (ou de la subvention des coûts d'homologation) concernant les pesticides à « petits » marchés. Cette évolution de la réglementation est d'ailleurs un des déterminants du développement des stratégies des firmes phytopharmaceutiques orientées sur les OGM.
De même, les comités d'homologation ont pour mission de juger les pesticides sur différents critères : efficacité agronomique, toxicité et écotoxicité. Comment pondèrent-ils ces différents critères ? Cette question rejoint celle des choix des pouvoirs publics en général.

Inciter la réduction de l'utilisation de pesticides : taxes sur le prix des pesticides
Pour un problème comme celui engendré par les pollutions par les pesticides, les économistes tendent à plaider en faveur de l'utilisation de taxes. Les taxes sur les pesticides ont de nombreux avantages.

- En réduisant la rentabilité de la lutte chimique, elles favorisent la demande des pratiques économes en pesticides par les agriculteurs, ce qui est leur rôle principal. Elles peuvent être adaptées aux niveaux de toxicité et d'écotoxicité des pesticides ce qui permet à la fois d'orienter les choix de leurs utilisateurs et de leurs producteurs. Adaptées en ce sens, elles complètent le rôle de la procédure d'homologation.
- Elles peuvent être mises en place progressivement, selon un calendrier préétabli ou en fonction des résultats obtenus en matière de réduction d'utilisation. En anticipant les effets de taxes ou de contraintes importantes dans l'avenir, les agriculteurs peuvent chercher à organiser leurs choix de production et/ou de pratiques sans subir les effets de ces taxes dans le présent et tenter de les éviter dans l'avenir.
- Contrairement à d'autres instruments généralement évoqués (subventions pour utilisation de pratiques économes en pesticides, normes ou quotas d'utilisation) les taxes imposent peu de coûts administratifs tout en laissant de la flexibilité aux agriculteurs dans leurs choix. L'effet incitatif des taxes ne repose pas sur la mise en place de procédures de contrôle/sanction au niveau des exploitations. C'est là un avantage important des taxes en matière de coûts administratifs par rapport aux mesures telles que les normes ou quotas d'utilisation, ou les contrats d'utilisation de pratiques économes en pesticides.
- Les taxes ont de bonnes propriétés incitatives à long terme en envoyant un signal clair et une incitation incontournable en faveur de la création et de l'utilisation d'alternatives à la lutte chimique. Dans une logique d'innovations induites, elles peuvent par ailleurs stimuler la mise en place d'un marché du conseil en protection phytosanitaire.

Bien entendu, la taxation des pesticides fait peser l'essentiel de la charge de la régulation des pollutions par les pesticides sur les agriculteurs et sur les producteurs et distributeurs de pesticides. C'est là le sens du principe pollueur-payeur. Si les pouvoirs publics désirent compenser les effets des taxes sur le revenu des agriculteurs (pour mieux répartir le coût social de la régulation ou pour d'autres raisons), il est alors important qu'ils choisissent des instruments qui ne remettent pas en cause l'effet incitatif des taxes. Par exemple, décider de ne mettre en place que de petites taxes pour ménager le revenu des agriculteurs revient *in fine* à réduire l'objectif environnemental fixé. De fait, réduire les utilisations de pesticides et soutenir le revenu des agriculteurs sont deux objectifs distincts. S'il est décidé d'utiliser des taxes pour le premier objectif, le meilleur moyen de remplir le second est de verser des compensations directement aux agriculteurs (des aides à l'hectare cultivé si l'objectif est l'occupation du territoire, des aides par actif agricole si l'objectif est de préserver l'emploi agricole, …). L'avantage de ces compensations est qu'elles sont conformes au principe de conditionnalité des aides européennes et conformes aux règles de l'OMC.

Le dernier avantage du système de taxation est qu'il génère un revenu pour l'Etat. Cet avantage est ici discuté à part dans la mesure où, dans l'optique de la régulation d'un problème de pollution le rôle principal des taxes est d'orienter les choix des agents pollueurs et non de lever des fonds publics. Bien entendu, le revenu des taxes peut être utilisé pour financer les compensations versées aux agriculteurs ou financer la mise en place des instruments de régulation complémentaires (homologation, instruments discutés plus bas, …). Ceci-dit, il n'y a *a priori* aucun argument économique invariable qui prouve que le revenu de la taxe doit être « reversé » d'une manière ou d'une autre au niveau du secteur taxé (le revenu des taxes peut financer des mesures de retour à l'emploi si la société juge ces mesures prioritaires, …).
Mais lorsqu'il est décidé que le revenu de la taxe doit servir à financer des mesures d'aide au secteur taxé, il convient de faire attention à ce que la question du niveau des taxes ne se transforme pas en une question concernant les opérations à financer. En effet, les représentants du secteur taxé auront tendance à chercher à minimiser le niveau des taxes en minimisant l'ampleur des opérations à financer. Le niveau de la taxe doit être calculé en fonction des objectifs de régulation environnementale, *i.e.* de manière à produire des incitations suffisantes. Si ces objectifs peuvent être négociés, le niveau des taxes ne doit pas l'être.

Mettre en place et organiser l'environnement technologique et le conseil agricole
Les alternatives à la lutte chimique sont des solutions techniques relativement complexes. Aussi, une réduction ambitieuse de l'utilisation des pesticides doit être un objectif de régulation de long terme. En effet, le secteur agricole ne pourra réduire de manière significative son utilisation de pesticides tout en préservant son revenu et sa compétitivité qu'en utilisant des pratiques économes en pesticides relativement complexes, *i.e.* exigeantes en main d'œuvre qualifiée. Il est nécessaire que ces pratiques soient définies (si elles ne le sont pas encore), développées, adoptées et finalement utilisées. Ces conditions ne pourront être mises en place que progressivement. Concernant la régulation des pollutions par les pesticides, les pouvoirs publics ont un rôle important à jouer au niveau de la recherche agronomique et du conseil agricole.

Financer la recherche agronomique
Les pratiques agricoles sont génériques dans le sens où elles regroupent des principes d'actions. Elles sont donc difficilement brevetables. La recherche les concernant doit donc être financée par le budget de l'Etat. De même, de manière à ce que ces pratiques puissent être adoptées puis utilisées, il convient :

- d'adapter ces pratiques aux demandes des agriculteurs. Dans cette optique, le rôle du contexte économique (présent et à venir) est essentiel. Si les agriculteurs savent que l'utilisation des pesticides sera lourdement taxée ou sévèrement réglementée à l'avenir, ils seront demandeurs de pratiques économes en pesticides.
- de diffuser l'information concernant les effets à attendre des pratiques développées. En effet, les bénéfices économiques attendus de l'utilisation d'une pratique et un déterminant essentiel de son adoption. D'une part, il convient de montrer aux agriculteurs que les bénéfices à attendre de cette adoption sont potentiellement importants. D'autre part, la diffusion de

l'information concernant les effets de ces pratiques réduit l'incertitude entourant ces effets lorsqu'ils sont mal connus. Il est montré que cette incertitude est un frein important à l'adoption.

Financer certaines formes de conseil et la formation

La mise en place d'un contexte réglementaire limitant l'utilisation de pesticides ou de mesures économiques visant à inciter à la réduction de l'utilisation des pesticides favorise l'émergence d'un secteur privé du conseil en protection phytosanitaire car elle favorise l'émergence d'une demande des agriculteurs dans ce domaine. Un tel secteur, notamment en ce qui concerne le dépistage des infestations, existe déjà aux Etats-Unis, au Canada, en Grande-Bretagne, voire dans certaines régions viticoles françaises. Dans le même ordre d'idées, les baisses de prix engendrées par la réforme de la PAC en 1992 ont été à l'origine du développement d'opérations de conseil et de formation en matière de protection des plantes telles que le Labo Vert du SRPV du Centre. Ceci offre d'ailleurs des possibilités de reconversion aux salariés des distributeurs de pesticides.

Cependant, certaines spécificités de la protection phytosanitaire rendent difficile l'émergence de certaines formes de conseil. En effet, certains déterminants des risques phytosanitaires se définissent à une échelle plus grande que celle d'une parcelle ou d'une exploitation. Aussi les informations concernant les prévisions d'infestations à l'échelle d'une petite région agricole sont difficilement valorisables pour une entreprise privée (il suffit que les agriculteurs concernés se regroupent pour partager le coût de ces prévisions). La production de ces informations a traditionnellement été organisée par les SRPV *via* les avertissements agricoles. Cependant d'autres modes d'organisation peuvent être imaginés. Il peut s'agir de subventions à des firmes privées ou des organismes techniques ou de subventions à des groupements d'agriculteurs qui organisent le partage d'informations communes (*i.e.* à caractère public).
D'autres informations sont spécifiques (car dépendantes des systèmes culturaux, …) aux exploitations. Elles peuvent être produites par les agriculteurs eux-mêmes ou par des experts dont les agriculteurs (notamment ceux qui ont des contraintes de temps importantes) pourraient se procurer les services. Dans les deux cas la formation est un élément crucial.

Subventionner l'adoption (et non l'utilisation) des pratiques innovantes

Les pratiques agricoles économes en pesticides sont délicates à adopter dans la mesure où elles doivent être testées puis adaptées localement. Ces spécificités génèrent des coûts d'adoption spécifiques : travail d'observation et prise de risque, notamment. L'adoption de pratiques innovantes requiert en fait deux conditions :

- Il est nécessaire que les agriculteurs anticipent que les bénéfices futurs (une fois la nouvelle pratique maîtrisée) attendus de la nouvelle pratique permettent d'amortir l'investissement initial (formation, matériel spécifique, …). Cette condition est nécessaire pour tout forme d'innovation, qu'elle soit simple à mettre en œuvre ou non. Elle est assurée par la diffusion de d'information génériques et la mise en place (dans un futur anticipé) d'un contexte économique et/ou réglementaire favorable à l'utilisation de la nouvelle pratique.
- Dans le cas de pratiques complexes et devant être adaptées localement, la condition précédente n'est pas suffisante. En effet, au coût de l'investissement initial il convient d'ajouter les coûts d'expérimentation et d'adaptation (*i.e.*, les coûts d'apprentissage) de la pratique innovante. En l'absence d'intervention publique l'adoption de pratiques innovantes peut être limitée, voire lente même lorsque l'intérêt de cette pratique est avéré.

Ceci peut justifier l'intervention de l'Etat lorsque les pratiques innovantes génèrent un bénéfice social, ce qui est le cas ici, et lorsque l'adoption de ces pratiques est caractérisée par des effets de réseau. L'Etat peut subventionner la phase d'adoption (donc transitoirement) des pratiques innovantes ou aider financièrement des structures telles que les GDA. Ces interventions visent à :

- aider les agriculteurs « précurseurs » à supporter les coûts spécifiques à l'adoption des pratiques innovantes

et :

- donc à amorcer le processus de diffusion des nouvelles pratiques.

En effet, les effets de partage de l'information (voire d'imitation) sont importants dans ce contexte. Les précurseurs servent d'exemple et de producteurs d'informations à leurs voisins. En ce sens ils génèrent des effets externes positifs que l'Etat rémunère *via* ses aides transitoires à l'adoption des pratiques innovantes. D'une part ceci permet d'amorcer un effet « boule de neige ». D'autre part, ceci évite que les agriculteurs adoptent des comportements stratégiques. En effet, il peut être rationnel pour un agriculteur d'attendre que ses voisins adoptent la nouvelle pratique pour bénéficier à moindre frais de l'information qu'ils auront produite. Si tous les agriculteurs adoptent ce comportement d'attente, le processus de diffusion peut être très lent. Le financement de structures telles que les GDA vise à favoriser l'organisation du partage de l'information que les agriculteurs peuvent produire les uns pour les autres dans une logique de coopération et donc à accélérer le processus de diffusion.

Il est important de rappeler ici que les subventions pour adoption de pratiques innovantes (recommandées par l'UE) n'ont de justifications que si elles sont transitoires. Ces subventions ne doivent être utilisées que lorsque les pratiques concernées s'avèreront rentables une fois maîtrisées, *i.e.* dont l'utilisation en régime de croisière ne nécessite pas d'aides. Dans le cas contraire, la logique des subventions est radicalement différente.

Agir en cohérence avec les autres mesures de régulation en place ou envisagées
Jusqu'à présent, le problème de la régulation des pollutions par les pesticides a été considéré de manière isolée. Or, tout au moins pour certaines cultures, il est évident que des mesures visant à réduire les autres pollutions d'origine agricole auront d'étroites relations avec les mesures de régulation de l'utilisation des pesticides. Ceci tient par exemple aux liens qu'entretiennent la fertilisation et la protection phytosanitaire au niveau agronomique. L'intérêt de la coordination entre les politiques de régulation des différents polluants d'origine agricole est, de notre point de vue, insuffisamment étudiée. Cette remarque s'applique tout particulièrement au cas de l'agriculture européenne, notamment pour les grandes cultures, les productions fourragères et le maraîchage.
En outre, l'évolution de la PAC aura certainement un impact sur l'utilisation des pesticides. Il convient alors d'identifier le rôle de ces évolutions.

10.2. Mettre en place des mesures spécifiques pour gérer des problèmes locaux

Les mesures présentées ci-dessus visent essentiellement à atteindre des objectifs *a minima*. Elles sont suffisantes pour réduire les effets des pollutions par les pesticides dans les zones les moins sensibles. Dans les zones plus sensibles, il convient de mettre en place des instruments complémentaires, *i.e.* pour atteindre des objectifs de réduction des effets des pollutions plus importants.
C'est en fait dans ces cas que la palette des instruments disponibles est la plus large. Il convient également de noter que l'efficacité des instruments utilisés localement est d'autant plus importante (de même que leurs coûts de mise en place sont d'autant moins importants) que les instruments globaux jouent leur rôle.
Typiquement, ces instruments concernent :

- les zones écologiquement sensibles,
- les zones de proximités avec des points d'eau

ou encore :

- les zones où les conflits d'usage de l'environnement sont importants (zones périurbaines, zones de production aquacole, …).

Bien entendu, la définition de ces instruments suppose ce zonage préétabli (zones Natura 2000, DCE, …).
Les mesures envisagées ici sont l'instauration locale de normes contraignantes (notamment des interdictions d'utilisation des pesticides) et la mise en place d'approches contractuelles où l'utilisation par les agriculteurs de pratiques (très) économes en pesticides est subventionnée sur une base permanente. En fait, ces deux approches visent à « fixer » les quantités de pesticides utilisées par les agriculteurs, sur une base obligatoire dans le premier cas, sur une base volontaire dans le second. Les subventions pour utilisation locale de pratiques (très) économes en pesticides sont justifiées d'un point de vue économique : elles sont les moins coûteuses lorsqu'elles ne sont utilisées que localement et doivent être utilisées lorsqu'une interdiction d'utilisation n'est pas justifiée.

Dans la logique de l'UE l'ensemble des mesures présentées ici donnent « droit » à des compensations (qui font partie intégrante de l'approche par les contrats) puisqu'elles demandent aux agriculteurs des efforts qui vont au-delà des *minima* requis ailleurs.
Notons simplement ici que les approches proposées ci-dessous sont généralement coûteuses pour le budget de l'Etat, notamment parce qu'elles nécessitent la mise en place d'un système de contrôle/sanction coûteux. Envisager d'utiliser ces instruments comme base de la régulation des pollutions par les pesticides, *i.e.* comme mesure globale, semble économiquement peu pertinent. En effet, un système de contrats peut être avantageusement remplacé par un système de taxation lorsqu'il est utilisé sur l'ensemble du territoire concerné.

Normes et/ou d'interdiction d'utilisation
Dans les zones les plus sensibles, il est justifié de mettre en place des normes d'utilisation (voire des normes de concentration de pesticides dans certaines masses d'eau, …) plus contraignantes.
Compte tenu des coûts du système de contrôle/sanction du respect des normes, il semble sensé de privilégier des systèmes d'interdiction, plus faciles à contrôler que le respect de « bonnes » pratiques. Bien entendu, ce choix des interdictions peu sembler coercitif mais trouve sa justification principale dans une volonté d'économie des fonds publics.
En outre, les lois concernant les installations classées sont généralement bien acceptée puisqu'elles permettent d'organiser *ex ante* la localisation des activités de production polluantes. La même logique peut être utilisée pour réorganiser *ex post* la localisation d'activités polluantes, notamment lorsque cette localisation s'est faite en négligeant son impact sur l'environnement ou lorsque la nature des conflits d'usage a évolué (*e.g.*, en zone périurbaine).
Dans cette optique, la généralisation (lorsque nécessaire) du principe des bandes enherbées aux périmètres des eaux de surface (rivières, lacs, fossés, …) ou des points de captage est une mesure intéressante puisque son respect est aisé à vérifier. Elle vise à compléter les dispositifs déjà en place.
L'option de l'agriculture biologique paraît intéressante (elle renvoie par ailleurs au point suivant) dans ce contexte. Non seulement elle repose sur un cahier des charges transparent et peut, dans une certaine mesure, s'autofinancer lorsque ses produits sont bien valorisés par le marché.

Approches contractuelles
Lorsque la nature du problème concerné ne justifie pas une interdiction d'utilisation des pesticides, des approches contractuelles peuvent être utilisées. Ces approches peuvent aller des contrats individuels cofinancés par l'UE dans le cadre des MAE à des approches collectives, par exemple lorsqu'il convient simplement de réduire la concentration de pesticides dans une rivière (approches par bassins versants). Ces approches ne seront pas développées ici car elles sont nombreuses et peuvent être très diverses.
L'articulation de ces mesures avec les mesures utilisées à l'échelle globale est double. D'une part, le système de taxation diminue d'autant les subventions (ou compensations) à verser aux agriculteurs pour l'adoption des contrats proposés localement. D'autre part, l'action de l'Etat en matière de recherche et de conseil doit également permettre l'adaptation des pratiques des agriculteurs soumis à de fortes contraintes.

10.3. Mise en place de mesures non centrées sur l'utilisation ou la qualité des pesticides

Les mesures proposées ci-dessus ne concernent que l'utilisation et la qualité des pesticides. Or, il peut être nécessaire d'agir sur d'autres secteurs que le secteur agricole ou celui de la production des pesticides.
Les mesures les plus souvent évoquées concernent les produits de l'agriculture biologique. En effet, si des mesures d'interdiction de l'utilisation des pesticides devaient être mises en place localement, l'agriculture biologique offrirait une alternative aux agriculteurs concernés. L'Etat peut prendre en charge une partie des coûts de la conversion à ces pratiques, voire subventionner ce mode de production.
Mais il peut également être envisagé de mettre en place des mesures spécifiques visant au développement de ces marchés spécifiques *via* :

- la valorisation et le renforcement de la crédibilité des labels pertinents,

- le développement de la sensibilisation des consommateurs (campagnes de publicité, éducation, …),
- le développement de canaux spécifiques de commercialisation (le co-financement par l'UE de la recherche par les agriculteurs de débouchés de produits fermiers est possible),
- …

Cette idée est déjà appliquée aux Pays-Bas, en Californie ou en Angleterre et est envisagée pour l'ensemble des Etats-Unis et par le Danemark. Ces instruments de régulation sont maintenant regroupés sous le terme d'instruments de troisième génération, les instruments de première génération regroupant les instruments réglementaires (normes, …) et les instruments de seconde génération étant les instruments d'incitation économique (taxes, subventions, contrats incitatifs, …).

La mise en place d'accords entre l'Etat, la grande distribution et les agriculteurs est une option potentiellement intéressante. Les efforts de certaines grandes enseignes en faveur des produits de l'agriculture biologique ou, à un degré moindre, de l'agriculture raisonnée montre que la grande distribution peut trouver un intérêt à ce type d'opération, notamment en termes d'image. Le partenariat de la distribution est nécessaire, notamment en raison du rôle des pesticides sur la conservation et l'aspect des produits frais.
Dans une logique similaire, les transformateurs des produits agricoles peuvent jouer un rôle au niveau du comportement des agriculteurs par l'adaptation de leurs cahiers des charges. Là encore des accords pourraient être passés entre l'Etat et les transformateurs. Malheureusement il est difficile d'estimer l'impact potentiel de ces accords, cette question n'ayant pas réellement été étudiée à notre connaissance.

11. Références (non référencées dans Carpentier *et al.*, 2005**)**

Alix, J., and D. Zilberman (2003). Industrial Organization and Institutional Considerations in Agricultural Pest Resistance Management, in R. Laxminarayan (ed) *Battling Resistance to Antibiotics and Pesticides*, Washington, DC: Resources for the Future.

Ambec, S., C. Langinier et S. Lemarié (2008). Incentives to reduce crop trait durability." *American Journal of Agricultural Economics* 90(2), 379-391.

Bandiera, O. and I. Rasul (2006). Social networks and technology adoption in Nothern Mozambique. *Economic Journal* 16(4), 869-902.

Bellon S., C. de Sainte Marie, P.-E. Lauri, M. Navarrete, T. Nesme, D. Plénet D., J. Pluvinage et R. Habib (2006). La production fruitière en France : le vert est-il dans le fruit ? *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 53, 5-18.

The Bichel Committee (1996). *Report from the main committee*. http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/udgiv/Publications/1998/87-7909-445-7/html/default_eng.htm

Bourguet, D., M. Desquilbet and S. Lemarié (2005). Regulating insect resistance management: the case of non-Bt corn refuges in the US. *Journal of Environmental Management* 76(3), 210-220.

Boussemart, J.-P., S. Blancard, D. Crainrich and H. Leleu (2008). How can ex post allocative inefficiency ex ante reveal risk preference? An empirical investigation on French wheat farms. *2ième Journées de recherches en sciences sociales INRA SFER CIRAD, 11-12 Déc., Lille*.

Butault, J.-P. et al.. (2009). Rapport EcoPhyto R&D.

Carpentier, A. (Coord.), J.-M. Barbier (Coord.), P. Bontems, A. Lacroix, R. Laplana, S. Lemarié et N. Turpin, 2005. « Aspects économiques de la régulation des pollutions par les pesticides. » *Chapitre 5, Rapport de l'Expertise Collective INRA/CEMAGREF : Pesticides, agriculture et environnement*. Ed. INRA, Paris, 261p.

Cressy, R. (2000). Credit rationing or entrepreneurial risk aversion? An alternative explanation for the Evans and Jovanovic finding. *Economics Letters* 66, 235-240.

Deverre, C. et C. De Sainte Marie (2008). L'écologisation de la politique agricole européenne. Verdissement ou refondation des systèmes agro-alimentaires ? *Review of Agricultural and Environmental Studies* 89(4), 83-104.

Eckstein, Z. 1984. A Rational Expectations Model of Agricultural Supply. *Journal of Political Economy* 92:1-19.

Hennessy, D. A. 2007. On Monoculture and the Structure of Crop Rotations. *American Journal of Agricultural Economics* 88(4), 900-914.

Hill S.B., MacRae R.J. (1995) Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7(1), 81-87.

Jacquet, F., J.-P. Butault et L. Guichard (2009). La réduction des pesticides en grandes cultures : modéliser l'adoption de systèmes de production à bas niveau d'intrants au niveau français. *Séminaire EcoProd, 16-17 Nov., Rennes*.

Just, R. E. (2008). Distinguishing Preferences from Perceptions for Meaningful Policy Analysis. *American Journal of Agricultural Economics* 90(5), 1165-1175.

Kuchler, F., K. Ralston and L. J. Unnevehr (1997). Reducing pesticide risks to US food consumers: can agricultural research help? *Food Policy* 22(2), 119-132.

Kuosmanen, T., D. Pemsl and J. Wesseler (2006). Specification and Estimation of Production Functions Involving Damage Control Inputs: A Two-Stage, Semiparametric Approach. *American Journal of Agricultural Economics* 88(2), 499-511.

Lemarié, S. (2003). Evolution des structures industrielles et de la concurrence dans les secteurs des semences et des pesticides." *Economie Rurale* 277-278, 167-182.

Lemarié, S. and S. Marette (2003). Substitution and complementarities in the biotechnology and pesticide markets: toward a theoretical framework *in* N. Kalaitzandonakes (ed.) *Economic and environmental impacts of agbiotech: a global perspective*, New York, Kluwer-Plenum: 287-305.

Ozarem, P. F., and J. A. Miranowski. 1994. A Dynamic Model of Acreage Allocation wit General and Crop-Specific Soil Capital. *American Journal of Agricultural Economics* 76(2), 385-95.

Sexton, S. E., Z. Lei and D. Zilberman (2007). The Economics of Pesticides and Pest Control. *International Review of Environmental and Resource Economics* 1, 271-326.

Thomas, 2003. A Dynamic Model of On-Farm Integrated Nitrogen Management. *European Review of Agricultural Economics* 30, 439-60.

Vanloqueren, G. and Ph. V. Baret, 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Research policy* 38, 971-983.

Wossink, A. (2007). Economics of Pesticide Reduction and Biological Control in Field Vegetables-A Cross Country Comparison. *European Review of Agricultural Economics* 34(4), 549-552.

Wossink, G.A.A., and W.A.H. Rossing. 1998. On Increasing Returns and Discrete Choice: Integrating Production Ecological Principles in Economic Analysis of Crop Management. *Journal of Environmental Management* 54, 233-47.

Zhengfei, G., A. Oude Lansink, M. van Ittersum and A. Wossink (2006). Integrating Agronomic Principles into Production Function Specification: A Dichotomy of Growth Inputs and Facilitating Inputs. *American Journal of Agricultural Economics* 88(1), 203-214.

Zhengfei, G., A. Oude Lansink, A. Wossink and R. Huirne (2005). Damage control inputs: a comparison of conventional and organic farming systems. *European Review of Agricultural Economics* 32(2), 167-189.

Zilberman, D. and K. Millock (1997). Financial incentives and pesticide use. *Food Policy* 22(2), 133-144.