



**HAL**  
open science

# Une analyse de la rationalité économique des choix des agriculteurs en matière de la protection fongicide du blé

Alain Carpentier, Xavier Reboud

## ► To cite this version:

Alain Carpentier, Xavier Reboud. Une analyse de la rationalité économique des choix des agriculteurs en matière de la protection fongicide du blé. 16. Journées de recherche en sciences sociales, INRAE; SFER; CIRAD, Dec 2022, Clermont Ferrand, France. hal-04793184

**HAL Id: hal-04793184**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04793184v1>**

Submitted on 20 Nov 2024

**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.

# Une analyse de la rationalité économique des choix des agriculteurs en matière de la protection fongicide du blé

Alain Carpentier (1), Xavier Reboud (2)

(1) INRA, UMR SMART-LERECO, Rennes

(2) INRA, UMR Agroécologie, Dijon

[Alain.Carpentier@inra.fr](mailto:Alain.Carpentier@inra.fr), [Xavier.Reboud@inra.fr](mailto:Xavier.Reboud@inra.fr)

Carpentier, A., X. Reboud (2022). Pesticides, information, and pest management under uncertainty. Behavioral insights from Prospect Theory. Presented at : 16. Journées de recherche en sciences sociales, Clermont-Ferrand, France (2022-12-15 - 2022-12-16). Communication orale

## Résumé

Il est souvent avancé que les agriculteurs « surutilisent » les pesticides, au sens où ils utilisent des quantités de pesticides inutilement élevées, sans que cette soit disant surutilisation ne soit ni prouvée, ni même définie par rapport à une référence établie. Nous examinons cette question pour le cas de protection fongique du blé tendre à partir des données publiées par Arvalis dans ses synthèses annuelles sur la protection des céréales à paille.

Trois résultats majeurs ressortent de nos analyses. (a) Les agriculteurs adaptent leurs utilisations de fongicides au risque économique auquel ils font face. Ces utilisations sont proches de l'optimum technico-économique en cas de risques moyens ou élevés mais dépassent significativement cet optimum lorsque les risques sont faibles. (b) Un programme de protection fongicide à deux traitements est justifié « en moyenne » sur la période 2003 – 2019 et semble valoir de référence pour « l'agriculteur français moyen ». S'il semble enclin à ajouter un traitement en cas de risque élevé, cet agriculteur semble réticent à faire l'impasse sur un traitement en cas de risque faible. (c) Selon de récents travaux en économie comportementale, la mécanique de décision de l'agriculteur français moyen serait celle de nombre de décideurs confrontés à des choix similaires.

Se référer *a priori* à un programme de protection qui est souvent celui à mettre en œuvre *in fine* semble naturel, surtout s'il tend à éliminer de substantiels risques de pertes. Se priver d'un traitement qui s'avère souvent utile est souvent considéré comme une prise de risque difficile à assumer.

## Abstract

We analyze French farmers' fungicide protection of winter soft wheat for uncovering the rationality underlying their fungicide treatment decisions. Our analysis combine theoretical investigations based on recent theoretical work related to risky economic choices and empirical investigations based on data published by Arvalis, the French Technical Institute for cereal production. These data describe the fungicide protection choices of the "average French farmer" for the 2003 – 2019 period.

Our main results are threefold. (a) Farmers' fungicide uses are close to the expected profit maximizing ones when disease risks are but they are significantly higher when the disease risks are low. (b) Two treatment protection programs appear to maximize expected profits in most considered years and seem to be considered as reference protection programs by the average French farmer. S/he easily adds a third, initially unexpected, treatment when the considered disease risk is higher than expected. But, s/he is reluctant to skip an initially planned treatment when the risk appear to be lower than expected. (c) These observations are nicely consistent to the predictions of the Prospect Theory of Kahneman and Tversky (1979) as complemented by Kőszegi and Rabin (2007).

Making risky decisions in recurrent situations by considering the ones that are the most frequently optimal as benchmarks is intuitive, especially when these reference decisions significantly reduce loss risks. Turning down a relatively safe option in unusually low risk situations for a more profitable but riskier option is difficult for most decision makers, especially when the safe option is often optimal.

## INTRODUCTION

Il est souvent avancé que les agriculteurs « surutilisent » les pesticides, sans que cette soit disant surutilisation ne soit ni prouvée, ni même définie par rapport à une référence clairement établie. En outre, cette surutilisation est souvent « expliquée » par la potentielle aversion face au risque des agriculteurs et/ou leur recours à des traitements pesticides plutôt préventifs que curatifs. Or, les notions d'aversion au risque ou de traitements préventifs sont souvent elles-mêmes mal définies et/ou interprétées. Aborder la question de la potentielle « surutilisation » des pesticides sur des bases clairement définies est nécessaire pour comprendre les décisions des agriculteurs en matière de protection cultures.<sup>1</sup>

Dans ce contexte, l'objectif de cet article est double. Il s'agit tout d'abord de revenir sur la question de l'utilisation des pesticides, et de leur éventuelle surutilisation, par les agriculteurs en adoptant un cadre d'analyse établi, celui de micro-économie. L'enjeu est ici de qualifier la rationalité des décisions de traitement des agriculteurs. Ensuite, nous examinons cette question à partir d'un cas concret. Nous analysons la protection fongicide du blé tendre des agriculteurs français en mobilisant des informations contenues dans la série annuelle des « Synthèse Nationale – Céréales à paille – Interventions de printemps » de la collection Choisir & Décider publiée par Arvalis (e.g., Arvalis, 2019).

L'utilisation des pesticides a été l'objet de nombreux travaux de recherche en économie de la production agricole (e.g., Carpentier *et al* 2005 ; Skevas *et al*, 2013). Le travail de recherche présenté dans cet article s'inscrit dans cette littérature mais s'avère original à double titre.

Tout d'abord, nous n'analysons pas les dépenses de pesticides dans leur globalité comme dans la plupart des études économiques traitant de cette question. Nous analysons les décisions de traitement comme une série de décisions tactiques qui s'inscrivent dans une stratégie globale de protection des cultures (laquelle s'inscrit elle-même dans une stratégie globale de production). Ceci nous amène à adopter un cadre d'analyse spécifique : la Théorie des Perspectives de Kahneman et Tversky (1979) telle qu'elle a récemment été étendue par Kőszegi et Rabin (2007). Ce cadre d'analyse, développé par des psychologues et des économistes spécialistes des décisions économiques risquées, s'avère particulièrement pertinent pour examiner des décisions qui (a) doivent être prises rapidement dans des situations caractérisées par des risques économiques faibles à modérés et (b) sont récurrentes, prises tous les ans en l'occurrence.

Ensuite, les données publiées par Arvalis peuvent supporter une analyse fine, quoique sur données agrégées, des décisions des agriculteurs français en matière de protection du blé tendre contre les maladies foliaires. En effet, elles décrivent à la fois le risque de maladie et les décisions de protection fongicide des agriculteurs de 2002 à 2019 et précisent l'efficacité de la protection chimique contre ces maladies. Elles nous permettent de comparer les utilisations moyennes de fongicides sur blé tendre des agriculteurs français et les utilisations moyennes « économiquement optimales »

correspondantes sur la période 2003 – 2019. Les utilisations « économiquement optimales » sont définies comme celles maximisant la marge espérée dans le contexte de l'année considérée. Elles sont calculées à partir des « dépenses repère » et des niveaux de nuisibilité reportés par Arvalis ainsi que de nos calculs de niveaux anticipés de prix et de nuisibilité. Nous complétons notre analyse par des calculs de rentabilité économique des programmes de protection fongicide employés par les agriculteurs.

Trois éléments majeurs ressortent de notre analyse des décisions de protection fongicide des producteurs français de blé tendre.

(a) Sur la période 2003 – 2019, la protection fongicide moyenne des agriculteurs français est rentable chaque année et très rentable certaines années. Cette protection a coûté entre 63 et 87€/ha en fongicides en moyenne par an, pour une moyenne de 73€/ha sur la période. Selon nos calculs, la rentabilité nette moyenne de ces dépenses moyennes varie entre 15 et 380€/ha par an, avec une moyenne de 138€/ha sur la période.<sup>2</sup> Cette rentabilité dépend du niveau de nuisibilité des maladies, qui varie de 0.83 à 2.71t/ha sur la période,<sup>3</sup> et du prix du blé, qui varie de 92 à 229€/t sur période.

(b) Les agriculteurs adaptent leur protection fongicide aux risques économiques auxquels ils font face chaque année, c'est-à-dire aux pertes potentielles dues aux maladies et aux perspectives de prix du blé de la campagne considérée. Les utilisations de fongicides des agriculteurs sont économiquement optimales, au sens de la marge espérée, en cas de risques économiques moyens ou élevés mais sont plus élevées que les utilisations optimales en cas de risques faibles. Un programme à deux traitements fongicides semble avoir valeur de référence dans le choix de « l'agriculteur français moyen ». De fait, nos calculs de rentabilité des programmes de protection fongicide montrent qu'un programme à deux traitements est souvent justifié. Mais, s'il semble enclin à ajouter un traitement en cas de risque plus élevé qu'attendu, l'agriculteur français moyen paraît plus réticent à faire l'impasse sur un traitement lorsque le risque s'avère être plus faible que prévu.

(c) Les décisions de traitement fongicides des agriculteurs semblent très largement confirmer les résultats théoriques que nous obtenons à partir la Théorie des Perspectives et des travaux de Kőszegi et Rabin (2007). Les agriculteurs articulent leurs décisions de traitement autour du programme de protection qu'ils pensent être amenés à mettre le plus souvent en œuvre, essentiellement dans une logique d'optimisation de leur revenu « en moyenne ». Ajouter un traitement supplémentaire ne leur pose pas de problème dès lors que ce traitement est justifié, là encore d'un point de vue strictement économique. Mais faire l'impasse sur un traitement qui s'avère

<sup>1</sup> Nous nous intéressons ici à la question de la surutilisation des pesticides, au sens où une moindre utilisation permettrait aux agriculteurs d'obtenir un meilleur revenu (tout au moins en moyenne). La question de la surutilisation des pesticides liée aux effets négatifs de ces produits sur l'environnement ou la santé humaine est d'une autre nature. Elle n'est pas abordée dans cet article.

<sup>2</sup> Les estimations de l'efficacité technique et économique de la protection fongicide des agriculteurs données ici tendent à sous-estimer l'efficacité réelle de cette protection. En effet, les moyennes des critères d'efficacité calculés au niveau des dépenses moyennes de fongicide sont inférieures à la moyenne des critères d'efficacité qui seraient calculés au niveau des dépenses de fongicide de chaque agriculteur, pour deux raisons. (a) Les agriculteurs adaptent leur niveau de protection au niveau de risque économique auquel ils font face. (b) Le risque fongicide varie significativement entre les régions de production et en fonction de la sensibilité aux maladies des variétés de blé cultivées (e.g., Arvalis, 2018). Néanmoins, nos calculs supposent que les agriculteurs mettent en œuvre leurs programmes de protection de manière aussi efficace que ceux mis en œuvre dans les tests d'Arvalis.

<sup>3</sup> Ces chiffres rendent compte des moyennes annuelles de la nuisibilité des maladies en France. La nuisibilité des maladies peut dépasser 4t/ha localement certaines années.

souvent utile en cas de risque économique faible est considéré comme une prise de risque difficile à assumer. De fait, de nombreux travaux en économie comportementale confirment nombre de décideurs confrontés à ce type de situation seraient confrontés au même dilemme.

Le reste de cet article est organisé comme suit. La première section présente une brève analyse de la littérature économique traitant de l'utilisation des pesticides par les agriculteurs. En particulier, cette analyse met en évidence le rôle de l'information disponible sur les risques phytosanitaires et discute des effets de l'éventuelle aversion au risque des agriculteurs sur leurs utilisations de pesticides. Dans la seconde section nous menons une analyse des mécanismes de décision de traitement phytosanitaire à partir de la Théorie des Perspectives et des travaux de Kőszegi et Rabin (2007). La troisième section présente les résultats que nous obtenons à partir des données d'Arvalis quant à la protection fongicide des producteurs français de blé tendre. Ces résultats empiriques sont confrontés aux résultats théoriques présentés dans la section précédente. Enfin, nous proposons quelques remarques conclusives.

## 1. UTILISATION DES PESTICIDES ET RISQUE : UNE BREVE REVUE DE LA LITTÉRATURE ECONOMIQUE

L'utilisation des pesticides par les agriculteurs a été l'objet de nombreux travaux de recherche en économie de la production agricole (*e.g.*, Carpentier *et al* 2005 ; Sexton *et al*, 2007 ; Skevas *et al*, 2013). Le fait que de nombreux traitements phytosanitaires des agriculteurs soient préventifs par nature a amené les économistes à analyser l'utilisation de pesticides comme une décision économique en avenir risqué et soulève immédiatement deux questions.

La première est relative à l'information utilisée par les agriculteurs. De quelles informations disposent-ils au moment de prendre leurs décisions de traitement ? En effet, des traitements préventifs ne sont pas nécessairement systématiques. Un traitement est préventif lorsqu'il est mis en œuvre contre un risque. La plupart des traitements fongicides visent à contrôler un risque de dommages avant que ces derniers n'impactent réellement la culture considérée. L'information disponible au moment de la décision de traitement peut être très limitée, notamment en cas de problèmes phytosanitaires dont l'évolution est difficilement prévisible, comme c'est le cas d'infestation directement liées aux conditions météorologiques. Il convient donc de toujours distinguer ce que les agriculteurs ont décidé – en fonction de l'information à leur disposition au moment de la décision considérée – et ce qu'ils « auraient dû » décider – étant donné ce qui est finalement advenu. Un traitement n'est systématique que lorsqu'il est appliqué sans tenir compte des risques de dommages attendus.

Acquérir de l'information sur l'état des cultures permet de préciser le risque phytosanitaire et, par là-même, de prendre des décisions plus pertinentes. Par exemple, les Bulletins de Santé du Végétal (BSV) rappellent aux agriculteurs qu'il leur faut examiner leurs cultures afin d'affiner les informations générales qu'ils contiennent. Néanmoins, cette acquisition n'est pas gratuite et la recherche d'information peut elle-même faire l'objet d'un calcul économique, et ce d'autant plus que l'information obtenue par un examen poussé des cultures est rarement « parfaite » au sens où elle n'élimine pas tout

risque autour de la décision de traitement. Constaté (une absence de) signes de maladie sur une culture ne garantit pas que la maladie (ne) va (pas) se développer dans les jours à venir. Quoique très importants (et intéressants) les mécanismes sous-tendant la recherche d'information sur l'état sanitaire de leurs cultures par les agriculteurs ne seront pas abordés ici.

Le fait que la plupart des décisions relatives à la protection des cultures soient risquées nous amène à la principale question que nous abordons dans cet article. Dans quelle mesure l'attitude face au risque des agriculteurs impactent-elle leurs décisions de protection des cultures ?

Schématiquement, en micro-économie des décisions en avenir risqué on considère que la décision d'un individu est affectée par son attitude face au risque lorsqu'il ne prend pas la décision qui optimise l'espérance de son revenu étant donné le risque auquel il est confronté. De fait, la décision de référence des micro-économistes – dite choix neutre face au risque – est la décision optimale d'un strict point de vue technico-économique, celle qui optimise le retour sur investissement espéré (*i.e.*, « en moyenne »). Ce choix est optimal au sens où il maximise le revenu espéré, c'est-à-dire en pondérant l'ensemble des résultats possibles par leur probabilité d'occurrence telle est perçue au moment de la décision.

Or, il est connu, au moins depuis les travaux de Von Neuman et Morgenstern dans les années 50, que les décisions en avenir risqué de la plupart des individus s'écartent de cette référence. La plupart des individus sont enclins à prendre des décisions qui leur permettent de réduire le caractère aléatoire de leur revenu, quitte à obtenir un revenu moins élevé « en moyenne ». Cette volonté d'optimiser le revenu espéré de la décision tout en cherchant à limiter le caractère aléatoire de ce revenu est ce qu'on appelle l'aversion au risque.<sup>4</sup>

Depuis les travaux fondateurs de Feder (1979), l'éventuelle aversion au risque des agriculteurs est souvent invoquée pour expliquer le niveau important d'utilisation des pesticides par les agriculteurs dans les pays économiquement développés (*e.g.*, Pannell, 1991 ; Sexton *et al*, 2007 ; Skevas *et al*, 2013). En effet, en contrôlant le risque phytosanitaire les pesticides permettent de réduire l'aléa de revenu des agriculteurs, tout au moins lorsque le risque phytosanitaire est le risque majeur auquel sont confrontés les agriculteurs (*e.g.*, Leathers et Quiggin, 1991 ; Horowitz et Lichtenberg, 1994). Aussi, l'éventuelle aversion face au risque des agriculteurs amèneraient ces derniers à utiliser les pesticides au-delà des quantités optimisant le revenu espéré afin d'atténuer l'aléa de leur revenu, dans une logique d'auto-assurance. Les évidences empiriques en faveur de cette hypothèse sont néanmoins assez mitigées (*e.g.*, Carpentier et Reboud, 2018).

Surtout, le rôle éventuel de l'aversion face au risque des agriculteurs dans leurs utilisations des pesticides est souvent mal interprété. D'une part, s'il était confirmé que les agriculteurs emploient les pesticides au-delà des niveaux qui

<sup>4</sup> Par exemple, lorsqu'il souscrit volontairement un contrat d'assurance, un individu paie une cotisation d'assurance qui lui permet de se débarrasser d'un risque économique. La cotisation qu'il paie est supérieure aux remboursements qu'il peut espérer « en moyenne ». Il perd de l'argent « en moyenne » mais élimine le risque d'abord à payer les dommages couverts grâce au contrat souscrit. La différence entre la cotisation payée et les remboursements espérés est nommée prime de risque. Elle provient de l'aversion face au risque du souscripteur du contrat et est à l'origine du profit obtenu par les compagnies d'assurance.

optimisent leur revenu « en moyenne », ce surcroît d'utilisation de pesticides ne peut être interprété comme une « surutilisation » au sens d'un gaspillage. Dans ce cas, les agriculteurs utiliseraient les pesticides non seulement pour augmenter leur revenu mais également pour stabiliser ce revenu, ce que serait enclin à faire la plupart des individus confrontés à cet type de situation de choix risqué.<sup>5</sup>

D'autre part, l'impact de l'éventuelle aversion face au risque des agriculteurs est très rarement quantifié de manière convaincante. Cet impact concerne-t-il 50% ou 5% des quantités de pesticides employées par les agriculteurs ? En effet, un fait important est souvent négligé. Si l'utilisation de pesticides permet de contrôler les aléas de production liés aux ennemis des cultures, elle permet surtout d'accroître significativement les rendements obtenus « en moyenne ». Ce constat est d'autant plus vrai dans les systèmes de production spécialisés reposant sur des itinéraires techniques ciblant des niveaux de rendement élevés. En effet, ces pratiques de production tendent à accroître les risques phytosanitaires (e.g., Aubertot *et al*, 2005). Les calculs présentés dans la suite à propos de la protection fongicide du blé tendre des agriculteurs français éclairent ce point.

## 2. DECISIONS DE TRAITEMENT ET ATTITUDE FACE AU RISQUE : LES APPORTS DE LA THEORIE DES PERSPECTIVES

Alors que la plupart des analyses économiques des utilisations des pesticides par les agriculteurs s'intéressent aux dépenses de pesticides en général, nous analysons ici les décisions de traitement phytosanitaire comme des décisions tactiques qui s'inscrivent dans une stratégie de protection des cultures. Ceci nous amène à adopter un cadre d'analyse spécifique pour décrire les déterminants et les mécanismes des décisions de protection des cultures des agricultures.

Analyser les dépenses de pesticides en général suppose de considérer les choix stratégiques des agriculteurs en matière de protection des cultures. Or, en matière de production agricole, les choix stratégiques diffèrent des choix tactiques pour deux raisons. D'une part, les enjeux économiques relatifs aux choix stratégiques de production sont plus importants que ceux relatifs aux choix tactiques. D'autre part, les choix tactiques sont souvent à prendre rapidement, en cours de saison, alors que les choix stratégiques peuvent être préparés sans précipitation.<sup>6</sup>

La Théorie de l'Utilité Espérée (TUE) a longtemps été le cadre d'analyse des décisions risqués privilégié en micro-économie. Néanmoins, il est maintenant largement admis dans la littérature économique que si la TUE fournit un cadre d'analyse approprié des choix à enjeux économiques importants, elle s'avère être moins pertinente pour l'analyse de décisions économiques à enjeux plus modestes (e.g., Rabin, 2000 ; Kőszegi et Rabin, 2007 ; Kahneman, 2011). En effet, les décisions à enjeux économiques modestes sont souvent prises

rapidement et justifient moins d'effort d'analyse de la part des décideurs que les décisions à enjeux importants. Ceci rend ces décisions plus vulnérables à des biais de comportements qui sont maintenant bien documentés dans les littératures psychologique et économique (e.g., Wakker, 2010 ; Kahneman, 2011 ; Thaler, 2016).

### 2.1. Traitements phytosanitaires, Théorie des Perspectives et niveau de protection de référence

Les décisions de traitement phytosanitaire des agriculteurs sont ici analysées en tant que décisions économiques en avenir risqué à enjeu modéré. En effet, déclencher ou non un traitement contre une maladie ou une infestation d'insecte est souvent une décision qui doit être prise rapidement et dont l'enjeu économique est moindre que celui de choix d'assolement ou d'investissement tel que des achats de gros matériel ou de terre.

Le premier biais de comportement lié aux décisions à enjeux modérés est lié au fait que les décideurs tendent à focaliser leur attention sur les conséquences immédiates du choix considéré, en négligeant les conséquences plus éloignées de ce choix (e.g., Wakker, 2010 ; Kahneman, 2011). Dans le cas de traitements phytosanitaires, accepter l'existence de ce biais consiste à supposer que les agriculteurs concentrent leur attention sur le risque phytosanitaire visé par le traitement envisagé, par exemple en considérant le potentiel de rendement de la culture tel qu'il est estimé au moment de la décision de traitement dans une logique séquentielle « myope » (e.g., Antle, 1983 ; Antle et Hatchett, 1986). Ceci peut les conduire à ignorer le fait que la culture pourra être par la suite largement affectée par divers événements climatiques ou phytosanitaires. Il convient néanmoins de noter que cette simplification du problème est justifiée lorsque le risque phytosanitaire considéré est un, voire le, risque majeur de la culture considérée et/ou lorsque les risques subséquents peuvent être efficacement contrôlés.

La Théorie des Perspectives (TP) de Kahneman et Tversky (1979) s'est progressivement imposée en tant qu'alternative à la TUE pour l'analyse des décisions économiques à enjeux modérés ou modestes (e.g., Barberis, 2013 ; Thaler, 2016).<sup>7</sup> Comme dans la plupart des applications de la TP, notre analyse se focalise sur deux éléments distinctifs de ce cadre d'analyse : (a) l'existence d'une valeur de référence définissant pertes et gains du point de vue du décideur et (b) l'hypothèse d'aversion à la perte.<sup>8</sup> Selon la TP, les individus confrontés à une décision risquée distinguent les pertes – en deçà d'un résultat de référence – des gains – au-delà de ce résultat de référence – et tendent à surpondérer les pertes (hypothèse d'aversion aux pertes). Ces comportements spécifiques conduisent à des choix privilégiant l'évitement des risques de perte. Les

<sup>7</sup> En économie agricole, Bocquého *et al* (2009) montrent que la TP explique mieux les choix d'agriculteurs français dans un contexte expérimental. Babcock (2015) montre que les choix d'assurance des agriculteurs américains sont mieux décrits par la TP que par la TUE.

<sup>8</sup> Nous ignorons trois phénomènes décrits par la TP: la distorsion des probabilités, l'aversion au risque dans le domaine des gains et le goût pour le risque dans le domaine des pertes. Négliger ces aspects de la TP est usuel car, selon Wakker (2010: 292), '... more than half of the risk aversion empirically observed has nothing to do with utility curvature or probability weighting, but is generated by loss aversion, the main empirical phenomenon regarding preference dependence.' En outre, l'aversion au risque dans le domaine des gains et le goût pour le risque dans le domaine des pertes importent peu lorsqu'on considère des choix à enjeux modestes (e.g., Rabin, 2000 ; Kőszegi and Rabin, 2007). Les résultats présentés ici demeurent valides, à quelques adaptations près, lorsque le phénomène de distorsion des probabilités est considéré.

<sup>5</sup> Nous nous intéressons ici aux décisions d'agriculteurs cherchant à obtenir le meilleur revenu possible de leur activité de production agricole. Les questions abordées ici diffèrent fondamentalement de celles liées aux effets de l'utilisation des pesticides sur l'environnement et la santé humaine.

<sup>6</sup> En outre, analyser les choix stratégiques des agriculteurs en matière de protection des cultures suppose d'examiner comment ces choix s'articulent avec les autres choix de production, ce qui peut s'avérer relativement complexe (e.g., Pannell, 1991 ; Horowitz et Lichtenberg, 1994 ; Carpentier et Reboud, 2018).

individus averses aux pertes ressentent plus de soulagement par l'élimination d'une perte que de satisfaction à obtenir un gain équivalent.<sup>9</sup>

Evidemment, le revenu de référence qui distingue pertes et gains joue un rôle crucial dans toute application la TP. Il est souvent supposé que le résultat de référence est celui obtenu dans le cas où l'individu décide de rien faire dans la situation considérée (*i.e.*, le *statu quo*). Dans le cas des traitements phytosanitaires, ceci reviendrait à considérer que les agriculteurs décident de l'opportunité d'un traitement en se référant au revenu qu'ils obtiendraient sans mettre en œuvre le traitement, c'est-à-dire au revenu « sans traitement ».

Or, nos résultats tendent à montrer que les agriculteurs peuvent également se référer au revenu « avec traitement », tout au moins pour certains traitements. En effet, il semble naturel de penser que si un traitement est souvent très utile alors les agriculteurs considèrent que traiter est leur choix par défaut (*i.e.*, le choix fait *in fine* en absence d'information supplémentaire). Des analyses menées par des sociologues et des agronomes sur les décisions de protection des cultures apportent des arguments en faveur de cette hypothèse. Les pesticides sont achetés en prévision d'un calendrier de traitement prévisionnel, impliquant que l'éventualité de ces traitements est prévue. En outre, il est fréquemment observé que des agriculteurs mettent en œuvre plus de traitements que recommandé par les experts en protection des cultures (*e.g.*, Jørgensen *et al*, 2008 ; Bürger *et al*, 2012), notamment parce que nombre d'agriculteurs semblent réticents à assumer des impasses de traitement lors des campagnes caractérisées par des risques phytosanitaires limités (*e.g.*, Lamine, 2011). Ces résultats suggèrent que, dans les cas étudiés tout au moins, le choix par défaut des agriculteurs est de traiter plutôt que de ne pas traiter.

De fait, définir la décision, et donc le revenu, de référence pour un traitement phytosanitaire donné revient à se demander comment les agriculteurs se représentent la décision associée à ce traitement. La question qu'ils se posent est-elle « ce traitement est-il utile ? » ou « ce traitement est-il inutile ? » ? D'un point de vue strictement logique, ces questions sont équivalentes.<sup>10</sup> Mais, comme cela sera vu ci-dessous, ces questions ne sont pas équivalentes du point de vue de la TP. Un agriculteur qui a pour décision par défaut le traitement se pose la question « ce traitement est-il inutile ? » au moment de la décision finale. Il est moins enclin à faire une impasse qu'un agriculteur qui a pour décision par défaut de ne pas traiter et qui se pose donc la question « ce traitement est-il utile ? ». Ce dernier accepte plus facilement de ne pas traiter. Cet effet de la décision de référence sur les choix de traitement est analysé formellement dans la sous-section suivante.

Bien entendu, étant donné l'importance de la décision de

<sup>9</sup> La TUE permet également d'expliquer des choix dits « risque averses » mais elle repose sur une logique différente. La TUE ne distingue pas pertes et gains. Elle se réfère à l'utilité des revenus (qui peuvent être négatifs) en supposant que cette utilité est croissante – tout revenu est utile – et concave – un revenu supplémentaire procure plus d'utilité lorsque le revenu est faible que lorsqu'il est élevé – dans le revenu. La TUE explique également pourquoi les individus font des choix privilégiant l'évitement des revenus les plus bas par rapport à la saisie d'opportunités de gains élevés. Néanmoins, la TUE ne permet pas d'expliquer les choix très averses au risque souvent observés dans des situations à enjeux modestes (*e.g.*, Segal et Spivak, 1990, Rabin, 2000).

<sup>10</sup> Ces questions sont d'ailleurs équivalentes dans le cadre de la TUE qui décrit le choix d'individus très rationnels selon le point de vue de la logique formelle standard.

référence sur la décision finale de traitement, la question de l'élaboration de la décision de référence devient elle-même cruciale. Kőszegi et Rabin (2007) ont récemment abordé cette question et développé un cadre d'analyse permettant de déterminer la décision de référence susceptible d'être adoptée par un individu confronté à un choix risqué donné. L'application de la solution proposée par ces auteurs au cas des traitements phytosanitaires est présentée dans la sous-section 2.3.<sup>11</sup>

## 2.2. Niveau de protection de référence et mécanismes de décision de traitement

Afin d'illustrer simplement les mécanismes de choix de traitement phytosanitaire tels qu'ils sont décrits par la TP et les travaux de Kőszegi et Rabin (2007), nous considérons à dessein une situation de choix très schématique. L'agriculteur considéré fait face à un risque phytosanitaire dichotomique. Selon sa perception (initiale) de ce risque, sa culture est infestée avec une probabilité  $p$  (comprise entre 0 et 1) et est saine avec une probabilité  $1 - p$ . En cas d'infestation, il évalue la valeur économique de sa perte de récolte à  $d$  (comprise entre 0 et  $y$ ). Une culture saine lui procure un revenu qu'il estime à  $y$ . L'agriculteur peut mettre en œuvre un traitement phytosanitaire pour limiter les effets de l'infestation considéré. Ce traitement coûte  $c$  et n'a aucun impact si la culture est saine. Il réduit les dommages engendrés par l'infestation de  $d$  à  $gd$  (avec  $g$  compris en 0 et 1). Le traitement est donc d'autant plus efficace que  $g$  est proche de 0.

Si l'agriculteur décide de traiter alors il obtient un revenu aléatoire noté  $r(1,p)$ . Son revenu est de  $y - c$  avec une probabilité  $1 - p$  (culture saine) et de  $y - c - gd$  avec une probabilité  $p$  (culture infestée). S'il décide de ne pas mettre en œuvre le traitement, l'agriculteur obtient un revenu aléatoire noté  $r(0,p)$ . Il obtient un revenu de  $y$  avec une probabilité  $1 - p$  et de  $y - d$  avec une probabilité  $p$  (culture infestée).

D'un point strictement économique, traiter est optimal si et seulement si le traitement est rentable en moyenne, c'est-à-dire si et seulement si  $c \leq p(1 - g)d$ . Dans ce cas, le coût du traitement est inférieur à la perte qu'il permet d'éviter en moyenne et le traitement est rentable d'un point de technico-économique standard. L'agriculteur n'adoptera cette règle de décision que s'il est neutre vis-à-vis du risque.<sup>12</sup> De nombreux travaux en économie montrent que peu d'individus raisonnent de cette manière.

Selon la TP, les individus distinguent pertes et gains selon un revenu de référence et sont averses aux pertes. Si son revenu de référence était fixe, noté  $r_{ref}$  ici, l'agriculteur évaluerait le revenu  $r$  à hauteur de  $u(r|r_{ref}) = r - a \max\{0, r_{ref} - r\}$ . Le terme  $\max\{0, r_{ref} - r\}$  définit la perte ressentie par l'agriculteur qui reçoit  $r$  alors que son revenu de référence est  $r_{ref}$ . Aucune perte n'est ressentie si  $r_{ref} \leq r$  mais la perte ressentie est égale à  $r_{ref} - r$  si  $r_{ref} > r$ . Le paramètre  $a$  rend compte de l'aversion à la perte de cet agriculteur. Il supposé positif ici. Son évaluation est généralement comprise entre 0.5 et 1, indiquant qu'un individu typique donne un poids entre 1,5 et 2 fois plus élevé aux pertes qu'aux gains dans son critère de décision (*e.g.*, Wakker, 2010). Le terme  $a \max\{0, r_{ref} - r\}$  peut être interprété

<sup>11</sup> Les résultats présentés dans les sous-sections suivantes s'inspirent largement de ceux obtenus et présentés par Carpentier et Reboud (2018).

<sup>12</sup> Il ne considère ni l'utilité de son revenu comme supposé dans la TUE, ni pertes ou gains comme supposé dans la PT.

comme le coût psychologique lié à la perte  $\max\{0, r_{\text{ref}} - r\}$ . Ce coût induit des choix d'évitement des pertes lorsqu'il n'est pas nul.

Dans les cas considérés ici, le revenu de référence est aléatoire. Kőszegi et Rabin (2007) proposent d'étendre la fonction d'évaluation  $u(r|r_{\text{ref}})$  en  $U(r|r_{\text{ref}}) = Eu(r|r_{\text{ref}}) = r - a E\max\{0, r_{\text{ref}} - r\}$  dans les cas où  $r_{\text{ref}}$  est aléatoire. Selon cette fonction d'évaluation, le niveau de revenu  $r$  est comparé à  $r_{\text{ref}}$  « en moyenne » pour déterminer le coût psychologique de la perte. Lorsque  $r$ , le revenu à évaluer est aléatoire, il est évalué en moyenne sur sa distribution de probabilité, avec  $EU(r|r_{\text{ref}})$ .

Dans la suite, nous considérons successivement le cas où le choix de référence est de « ne pas traiter » et celui où la décision de référence est de « traiter », sachant qu'à ces décisions de référence correspondent les revenus de référence  $r(0, p)$  et  $r(1, p)$ .

Afin d'illustrer le rôle spécifique de la décision de référence nous supposons ici que, juste avant de prendre sa décision de traitement, l'agriculteur a reçu des informations l'amenant à réviser sa perception initiale de la probabilité d'infestation,  $p$ , en  $p_e$ . Schématiquement,  $p$  décrit la perception du risque en début de campagne alors que  $p_e$  décrit la perception du risque après réception des BSV et examen des parcelles. Selon le cadre d'analyse de Kőszegi et Rabin (2007), l'agriculteur ne modifie pas son revenu de référence mais évalue ses choix à partir de sa perception actualisée de la probabilité d'infestation.

Si l'agriculteur considère que son choix par défaut est de ne pas traiter alors son revenu de référence est donné par  $r(0, p)$  et il évalue ses options à partir de la fonction d'évaluation  $EU[r|r(0, p)]$ . De ce fait, il décidera de traiter si et seulement si  $EU[r(1, p_e)|r(0, p)] \geq EU[r(0, p_e)|r(0, p)]$ . Il est aisé de montrer que l'agriculteur se référant à la décision de ne pas traiter *a priori*, c'est-à-dire se référant au revenu « sans traitement »  $r(0, p)$ , décidera de traiter *in fine* si et seulement si :

$$(1) \quad c \leq p_e (1 - g) d.$$

Dans ce cas, le choix de l'agriculteur est essentiellement technico-économique : le traitement est mis en œuvre si et seulement s'il est rentable « en moyenne », comme si cet agriculteur était neutre aux risques de pertes.

De fait, l'aversion face aux pertes a deux effets sur la décision de l'agriculteur. Ce dernier encourt une sensation de perte s'il traite alors que la culture est saine (perte du coût  $c$  du traitement) ou s'il ne traite pas alors que la culture est infestée (perte de revenu égale à  $(1 - g)d - c$ ). Ces deux sensations de perte potentielles ont des effets opposés, qui se compensent exactement dans le cas considéré. Dans une certaine mesure, un agriculteur qui choisit de ne pas traiter *a priori* accepte par là-même les risques associés aux décisions de traiter ou de ne pas traiter.

Si l'agriculteur considère que son choix par défaut est de traiter alors son revenu de référence est donné par  $r(1, p)$ . Il décidera de mettre en œuvre le traitement si et seulement si  $EU[r(1, p_e)|r(1, p)] \geq EU[r(0, p_e)|r(1, p)]$ . L'agriculteur se référant à la décision de traiter *a priori*, c'est-à-dire se référant au revenu « avec traitement »  $r(1, p)$ , décidera de traiter *in fine* si et seulement si :

$$(2) \quad c \leq p_e (1 - g) d + s(p_e, a).$$

où :

$$(3) \quad s(p_e, a) = a (1 + ap_e)^{-1} (1 - p_e) (1 - g) p_e d \geq 0.$$

Puisque le terme  $s(p_e, a)$  est positif, l'agriculteur ayant pour

décision par défaut de traiter pourra mettre en œuvre le traitement même s'il n'est pas rentable en moyenne. Le fait qu'il se réfère au revenu « avec traitement » implique qu'il considère le coût du traitement comme un coût usuel, et non pas comme un investissement risqué. Ce coût n'engendre donc pas de sensation de perte. Ceci a pour conséquence que l'agriculteur ne considère qu'une perte potentielle : la perte de revenu s'il ne traite pas alors que la culture est infestée.

De fait, cet agriculteur mettra en œuvre un traitement non rentable en moyenne s'il estime que le coût de ce traitement est justifié par son souhait d'éviter de potentielles sensations de pertes, selon une logique d'auto-assurance. En particulier, il pourra être réticent à faire une impasse de traitement même lorsque le risque perçu *a posteriori* ( $p_e$ ) est plus faible que le risque tel qu'il est évalué *a priori* ( $p$ ). En effet,  $p_e$  doit être suffisamment petit pour la condition  $c \geq p_e (1 - g) d + s(p_e, a)$  soit satisfaite, le terme  $p_e (1 - g) d + s(p_e, a)$  étant décroissant en  $p_e$ . Evidemment, cette réticence est d'autant plus importante que l'agriculteur considéré est averse aux pertes, le terme  $s(p_e, a)$  étant croissant en  $a$ .

### 2.3. Choix du niveau de protection de référence

Etant donné l'importance de l'impact de la décision de référence, « traiter *a priori* » ou « ne pas traiter *a priori* », sur la décision de traitement qui sera finalement prise, être en mesure de déterminer le choix de la situation de référence apparaît crucial ici.

Selon Kőszegi et Rabin (2007), les individus choisissent leur décision, et donc leur revenu, de référence dans une situation de choix donnée de sorte à ce que (a) la décision de référence soit optimale pour l'individu qui se réfère à cette décision et (b) il n'existe pas d'autre décision de référence ayant une évaluation strictement supérieure. La condition (a) indique que la situation de référence choisie doit être ce que Kőszegi et Rabin (2007) nomment un *équilibre personnel* : la décision de référence doit être optimale pour l'individu qui se réfère à cette décision. La condition (b) indique simplement que si plusieurs décisions conduisent à un équilibre personnel alors l'individu choisira celle avec la valeur maximale selon le critère des fonctions valeur associés à ces décisions de référence potentielles.

Bien que paraissant obscurs *a priori*, ces concepts et conditions reposent sur des intuitions relativement simples. Les individus faisant face à des choix risqués tiennent compte, plus ou moins sciemment, de ce que leur décision de référence impacte leurs sensations potentielles de pertes. Ils choisissent ces décisions de référence pour optimiser leur revenu espéré tout en cherchant à minimiser les coûts psychologiques liés aux risques de pertes qu'ils encourrent. Les décisions conduisant à des équilibres personnels sont intéressantes pour les individus averse aux pertes car les risques de sensations de pertes diminuent d'autant que les décisions qui sont prises *in fine* sont proches des décisions de référence.

Appliqué au cas des traitements phytosanitaires, l'approche de Kőszegi et Rabin (2007) implique que les agriculteurs choisissent leur décision par défaut en début de campagne, traiter ou ne pas traiter, en fonction de la décision qu'ils estiment qu'ils seront vraisemblablement amenés à prendre *in fine*, après avoir obtenu de l'information sur l'état sanitaire de leurs cultures.

Pour l'agriculteur considéré dans notre exemple adopter la

décision de traiter comme situation de référence conduit à un équilibre personnel si et seulement si  $EU[r(1,p)|r(1,p)] \geq EU[r(0,p)|r(1,p)]$ , c'est-à-dire si et seulement si  $c \leq p(1-g)d + s(p,a)$ . Adopter la décision de ne pas traiter comme situation de référence conduit à un équilibre personnel si et seulement si  $EU[r(1,p)|r(0,p)] \leq EU[r(0,p)|r(0,p)]$ , c'est-à-dire si et seulement si  $c \geq p(1-g)d$ . Ces résultats impliquent que la décision de ne pas traiter *a priori* est la décision de référence optimale lorsque  $c \geq p(1-g)d + s(p,a)$ . De même, la décision de traiter *a priori* est la décision de référence optimale lorsque  $c \leq p(1-g)d$ , c'est-à-dire lorsque le traitement est rentable en moyenne *a priori*. Lorsque  $p(1-g)d \leq c \leq p(1-g)d + s(p,a)$  les deux décisions de référence potentielles conduisent à des équilibres personnels. Il est cependant aisé de montrer que cette condition implique que  $EU[r(1,p)|r(1,p)] \geq EU[r(0,p)|r(0,p)]$  pour un agriculteur averse aux pertes et donc que ce dernier adoptera la décision de traiter *a priori* en tant que décision de référence dans ce cas.

Ces résultats impliquent donc qu'un agriculteur averse aux pertes adoptera la décision de traiter *a priori* en tant que décision de référence dès lors que  $c \leq p(1-g)d + s(p,a)$ , c'est-à-dire lorsque le traitement est suffisamment rentable en moyenne *a priori*.

Bien entendu, le choix de décision de référence dépend du traitement considéré. Par exemple, un agriculteur peut se référer à la décision de ne pas traiter *a priori* s'il emploie des variétés offrant une bonne résistance contre la maladie visée alors qu'il pourrait se référer à la décision de traiter *a priori* s'il employait une variété sensible à cette maladie.

De la même manière, pour une maladie dont le contrôle peut reposer sur des programmes allant jusqu'à (par exemple) trois traitements, les agriculteurs peuvent se référer un programme à un nombre donné de traitements, selon leurs perceptions de la maladie considérée dans leurs parcelles. Un agriculteur estimant ses cultures très exposées au risque de cette maladie pourra se référer à un programme complet à trois traitements alors qu'un agriculteur estimant les siennes moyennement exposées pourra opter pour une référence à un programme limité à deux traitements. Dans ce cas le premier agriculteur traiterait *a priori* pour les trois traitements « typiques » du programme de protection complet. Le second agriculteur traiterait *a priori* pour deux traitements « typiques » du programme complet et ne traiterait pas *a priori* pour le traitement restant, qui peut (par exemple) être le premier ou le dernier du programme complet « typique ».

#### 2.4. Décisions de traitement phytosanitaire : du rôle de l'attitude face au risque des agriculteurs et de la rentabilité des traitements

L'analyse développée dans cette section a mis en évidence le rôle de l'attitude face au risque des agriculteurs dans leurs décisions de traitement, tel qu'il est décrit par la TP. De fait, l'éventuelle aversion aux pertes des agriculteurs joue potentiellement à deux niveaux dans les décisions des agriculteurs. Tout d'abord, elle tend à favoriser l'adoption de la décision de traiter en tant que décision par défaut. Ensuite, lorsque l'agriculteur a décidé de traiter par défaut, son aversion aux pertes le rend réticent à ne pas traiter en cas de risque plus faible qu'attendu. En revanche, l'aversion face aux pertes d'un agriculteur n'a pas d'impact (tout au moins dans l'exemple schématisé considéré ici) sur sa décision de traitement finale s'il a adopté la décision de ne pas traiter *a*

*priori*. Cet agriculteur ne mettra en œuvre le traitement que s'il s'avère rentable en moyenne étant donné l'information disponible au moment de la décision finale.

Néanmoins, il convient de ne pas sous-estimer le rôle des déterminants purement technico-économiques des décisions de traitement. En effet, la décision de traiter ou non repose toujours sur un arbitrage entre la rentabilité espérée du traitement d'une part, et les coûts psychologiques liés aux sensations potentielles de pertes d'autre part.

Un agriculteur averse aux pertes se référant à la décision de traiter *a priori* ne mettra pas en œuvre le traitement considéré s'il le juge trop peu rentable, malgré ses réticences à ne pas traiter. A l'opposé, un agriculteur mettra en œuvre un traitement rentable en moyenne, quel que soit son aversion aux pertes ou sa décision de référence.

L'objectif de la section suivante est d'analyser les déterminants de la protection fongicide des producteurs français de blé tendre (d'hiver), à partir du cadre d'analyse théorique développé ici et des données mises à disposition des céréaliculteurs par Arvalis pour les aider à cadrer leurs décisions de protection fongicide de blé tendre dans le contexte français.

### 3. ANALYSE DE LA PROTECTION FONGICIDE DU BLE TENDRE EN FRANCE

Pour ce qui nous intéresse dans cette étude, la série des « Synthèse Nationale – Céréales à paille – Interventions de printemps » de la collection Choisir & Décider d'Arvalis (e.g., Arvalis, 2019) fournit, pour la période 2002 – 2019, la nuisibilité moyenne des maladies du blé tendre en France, les dépenses moyennes de fongicides des producteurs français de blé tendre et des « dépenses repères » de fongicides en fonction du prix attendu du blé tendre et de la nuisibilité observée des maladies (depuis 2010). Ces dépenses repères correspondent aux dépenses maximisant le retour sur investissement des dépenses de fongicides contre les maladies du blé tendre.

Les données d'utilisation des fongicides par les agriculteurs considèrent l'ensemble des fongicides employés sur blé tendre. Les dépenses repères et les niveaux de nuisibilités ne concernent que les principales maladies foliaires du blé, la septoriose et la rouille brune. Selon les experts d'Arvalis que nous avons consultés, de 80 à 100% des dépenses de fongicides des agriculteurs visent ces deux maladies, les autres maladies du blé tendre étant bien moins fréquentes.

En outre, il est important de rappeler que la nuisibilité des maladies dépend significativement de la variété de blé tendre semée. Toujours d'après les experts d'Arvalis que nous avons consultés, les agriculteurs français ont sensiblement accru leur utilisation de variétés résistantes aux maladies. Les niveaux de nuisibilité reportés par Arvalis tiennent compte de cette évolution. De même, le développement des maladies du blé dépend directement des conditions météorologiques. Les régions de production situées en façade océanique connaissent des niveaux de nuisibilité nettement plus élevés que les régions jouissant d'un climat continental (e.g., 2.13t/ha en moyenne en Bretagne contre 0.76t/ha en moyenne en Champagne-Ardenne en 2019) (Arvalis, 2019). Là encore, les mesures de nuisibilité d'Arvalis sont représentatives des expositions variées des régions françaises aux maladies du blé



tendre.

Enfin, les niveaux de nuisibilité reportés par Arvalis mesurent les pertes de rendement qu'il est possible d'éliminer par des programmes de traitement qui peuvent être mis en œuvre dans les exploitations. En ce sens, ils ne mesurent pas les pertes potentielles maximales que peuvent engendrer les maladies du blé.

Nous avons complété les données fournies par Arvalis par les données de prix du blé tendre payés aux producteurs fournis par France Agrimer (application Visionet du site internet de France Agrimer) et par les indices des prix du blé tendre et des fongicides utilisés sur cultures annuelles (puis sur grandes cultures) fournis par le Service de la Statistique et de la Prospective du ministère en charge de l'agriculture (site internet « Agreste »).

Dans la suite, les valeurs et coûts sont exprimés en prix courants alors que les utilisations de fongicides sont définies comme les dépenses de fongicides à l'hectare calculés aux prix en vigueur en 2018. Les niveaux de nuisibilité sont exprimés en tonnes de blé par ha. Les prix du blé sont exprimés en Euros par tonne. Les données collectées sont représentées dans la Figure 1 pour la période 2002 – 2019.

Nous utilisons les données ainsi collectées pour analyser les utilisations de fongicides sur blé tendre en France selon une procédure en trois étapes.

Tout d'abord, nous utilisons les « dépenses repères » pour estimer la courbe de réponse des dommages aux utilisations de fongicides qui sous-tend ces niveaux de dépenses de référence. Cette courbe nous permet d'évaluer la rentabilité des utilisations de fongicides dans tout type de contexte de prix et de nuisibilité.

Ensuite, estimons les anticipations du prix du blé et de nuisibilité des maladies des agriculteurs expliquant au mieux leurs utilisations moyennes de fongicides constatées. En effet, notre objectif principal est ici de comparer les utilisations de fongicides des producteurs de blé aux dépenses repères proposées par Arvalis, ces derniers donnant le niveau optimal d'utilisation des fongicides d'un strict point de vue technico-économique. Pour ce faire nous devons tenir compte de ce que les agriculteurs ne connaissent, au moment de leurs décisions de traitements fongicides, ni la nuisibilité des maladies, ni le prix auquel ils vendront leur blé. Ces déterminants essentiels des dépenses de fongicides sont très variables d'une année à l'autre et sont difficilement prévisibles (voir Figure 1). Les agriculteurs prennent néanmoins leurs décisions à partir de leurs estimations de ces prix et nuisibilités, ce que les économistes nomment anticipations.

Enfin, nous comparons les utilisations de fongicides des agriculteurs aux utilisations optimales d'un strict point de vue économique et nous analysons ces comparaisons à la lumière de nos résultats théoriques.

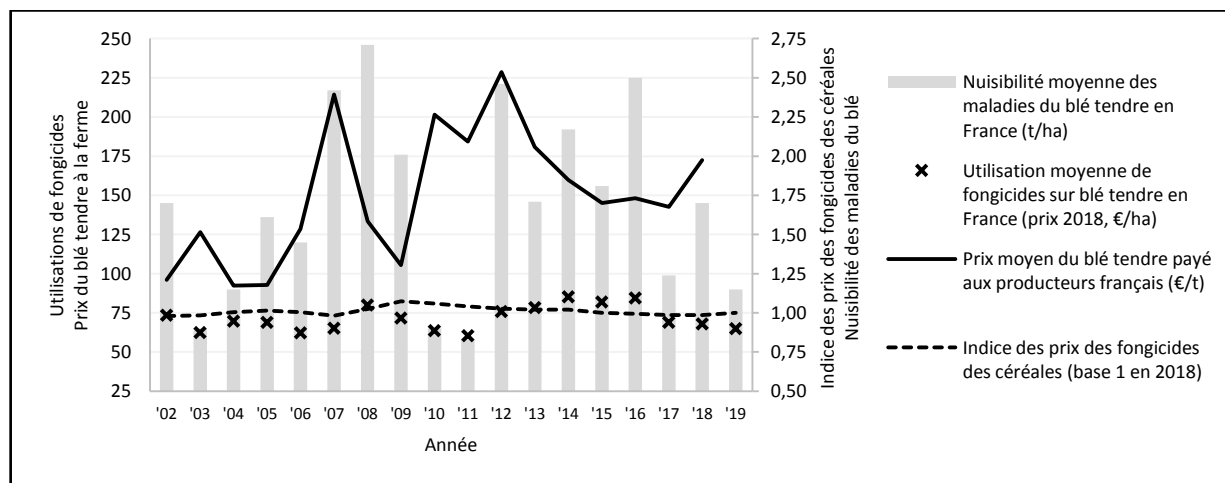


Figure 1 – Les utilisations moyennes de fongicides sur blé tendre en France et leurs déterminants, 2002 – 2019

### 3.1. Rentabilité économique des utilisations de fongicides

Les dépenses repères proposées par Arvalis correspondent aux utilisations optimales de fongicides d'un point de vue technico-économique. En 2018, elles sont données pour des prix du blé de 110 à 190€/t par incréments de 10€/t et pour des niveaux de nuisibilité des maladies de 0.5 à 4t/ha par incréments de 0.5t/ha (Arvalis, 2019).<sup>13</sup> Les dépenses repères proposées par Arvalis suivent à 1€ près une équation de la forme  $x^o(n,v) = a_0 + a_1 n + a_2 v + a_3 + vn$ .

En notant  $h(x)$  la part des dommages dus aux maladies éliminés par l'application d'une quantité  $x$  de fongicides à

l'hectare<sup>14</sup>, le retour sur investissement de cette quantité de fongicides est donnée par  $r(x;n,v) = v h(x) n - w x$  où  $n$  est le niveau de nuisibilité des maladies,  $v$  est le prix du blé et  $w$  celui des fongicides. Les quantités de fongicides données par les dépenses repères correspondent aux niveaux de  $x$ , notés  $x^o(n,v)$  maximisant  $r(x;n,v)$  en  $x$ . En supposant que la fonction de réduction de dommage  $h(x)$  est strictement croissante et strictement concave en  $x$  la quantité optimale  $x^o(n,v)$  est caractérisée par la condition du premier ordre du programme de maximisation de  $r(x;n,v)$  en  $x$ , c'est-à-dire par la condition  $h'[x^o(n,v)] = w(vn)^{-1}$  où  $h'(x)$  est la dérivée de  $h(x)$  en  $x$ .

Les 64 dépenses repères fournies par Arvalis en 2018 fournissent alors un « échantillon » de 64 triplés  $(x^o(n,v), n, v)$  permettant d'estimer la fonction  $h'(x)$  par la méthode des moindres carrés. La fonction  $h'(x)$  est obtenue par morceaux pour  $n = 0.5$ ,  $n = 1$  et  $n \geq 1.5$ . De simples régressions linéaires

<sup>13</sup> Des dépenses repères sont fournies par Arvalis depuis 2010. Elles ont peu évolué jusqu'en 2017. Les modifications apportées sont minimes pour les cas à faibles niveaux de nuisibilités mais sont d'autant plus importantes, avec des diminutions de dépenses repères, que les niveaux de nuisibilité sont élevés. Les principaux résultats présentés ici ne sont pas affectés par ces modifications.

<sup>14</sup> Selon un programme de protection mené de manière approprié.

des  $\ln[w(vn)^{-1}]$  sur les  $\ln[x^0(n,v)]$  donnent des ajustements caractérisés par des  $R^2$  dépassant 0.991, indiquant que les morceaux composant  $h'(x)$  peuvent être approximés de manière très satisfaisante par des fonctions puissance de  $x$ . Ces fonctions peuvent ensuite être intégrées en  $x$  puis « raccordées »<sup>15</sup> pour obtenir la fonction de réduction de dommage  $h(x)$  à une constante d'intégration près. La constante d'intégration a été calculée en supposant que 141€ (en 2018) de fongicides permettent une réduction de 95% des dommages dus maladies mesurés par Arvalis.<sup>16</sup> La fonction de réduction de dommage obtenue est approximée de manière très satisfaisante par une fonction polynomiale à l'ordre 5, avec

$$h(x) = -0.9878 + (x/100)^5 + 4.6734 (x/100)^4 - 8.7061 (x/100)^3 + 8.1406 (x/100)^2 - 4.1386 (x/100) + 0.8613$$

où  $x$  est exprimé en €/ha.

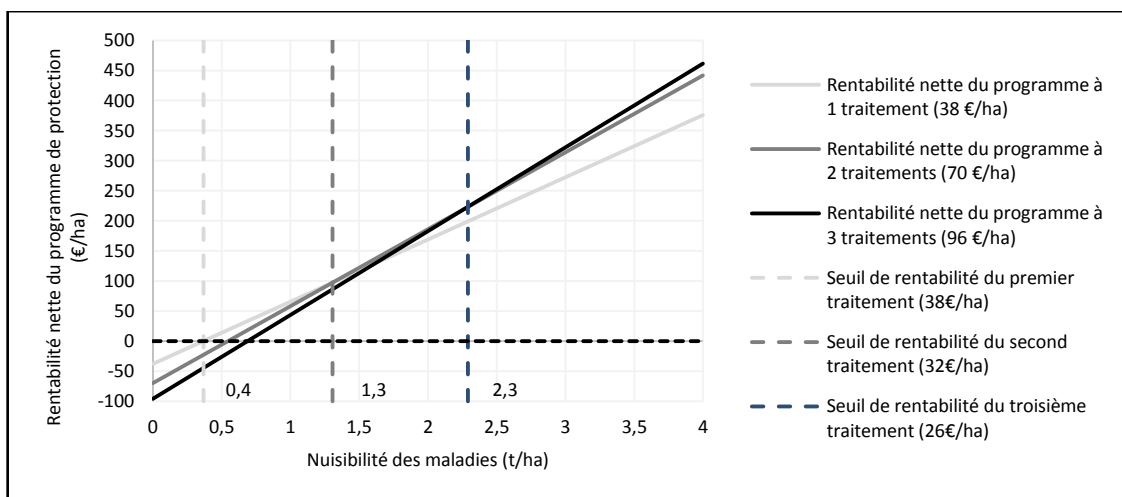
La fonction de réduction de dommage  $h(x)$  ainsi obtenue indique que des utilisations de 38€/ha, respectivement 70 et 96€/ha, permettent des réductions de dommage de l'ordre de 67%, respectivement 80 et 87%. Ces utilisations de 38€/ha, respectivement 70 et 96€/ha, correspondent aux utilisations moyennes des programmes de protection fongicide du blé tendre à 1 traitement, respectivement 2 et 3 traitements, sur la période 2007 – 2019 en France. Ces résultats soulignent que l'efficacité marginale des fongicides est fortement décroissante.

Ces propriétés de la fonction  $h(x)$  impactent fortement la rentabilité économique des différents programmes de traitement fongicide du blé. Les Figures 2 et 3 donnent la rentabilité nette, calculée à partir de la fonction  $r(x;n,v)$ , des trois programmes de protection du blé considérés ci-dessus en fonction de la nuisibilité des maladies, le déterminant le plus variable de la protection fongicide du blé. Le prix du blé est fixé à 160€/t, soit proche du prix moyen du blé observé ces dix dernières années.

La Figure 2 montre que la rentabilité de la protection du blé est négative lorsque la nuisibilité des maladies est inférieure à 0.4t/ha. En revanche, elle s'élève à plus de 400€/ha en cas de nuisibilité de l'ordre de 4t/ha. Le niveau de nuisibilité moyen des maladies du blé tendre est de 1.7t/ha sur la période 2003 – 2019. A ce niveau de nuisibilité la rentabilité de la protection fongicide du blé est de l'ordre de 140€/ha. Les niveaux de rentabilité nette des différents programmes de protection sont généralement très proches, le programme à 1 traitement s'avérant être le seul rentable en cas de nuisibilité très faible mais s'avérant être de moins en moins rentable par rapport aux autres à mesure que la nuisibilité des maladies augmente.

<sup>15</sup> Les intégrales des fonctions composant  $h'(x)$  sont raccordées de telle sorte à ce que la fonction  $h(x)$  soit continue et aussi « lisse » que possible.

<sup>16</sup> Correctement appliqués ces 141€ de fongicides devraient éliminer 100% des dommages dus maladies telle qu'elle est mesurée par Arvalis.



**Figure 2** – Rentabilité nette des programmes de protection fongicide du blé tendre en fonction de la nuisibilité des maladies (Prix du blé fixé à 160€/t)

Le troisième traitement n'est rentable, pour un prix du blé à 160€/t, que lorsque la nuisibilité des maladies dépasse 2.3t/ha. Mais, même dans ces cas, la rentabilité de ce traitement est relativement modeste, de moins de 20€/ha.

En revanche, le second traitement s'avère rentable dès que la nuisibilité dépasse 1.3t/ha. Sa rentabilité s'approche 30€/ha dès que la nuisibilité dépasse 2.5t/ha et s'élève jusqu'à près de 70€/ha lorsque la nuisibilité atteint 4t/ha. De fait, le programme à 2 traitements est le programme optimal pour un prix du blé de l'ordre de 160€/ha et une nuisibilité de 1.7t/ha, le niveau de nuisibilité moyen sur la période 2003 – 2019.

### 3.2. Estimation des anticipations des prix du blé et des niveaux de nuisibilité des agriculteurs

Les utilisations moyennes observées de fongicides des producteurs français de blé tendre, notées  $x_t$  pour  $t$  allant de 2003 à 2019, ont été décidées par les agriculteurs en fonction de leurs anticipations des prix du blé et des niveaux de nuisibilités des maladies du blé au moment de leurs décisions de traitements fongicides. Ces anticipations n'étant pas connues, nous les estimons en posant des hypothèses sur leur forme fonctionnelle et sur leur effet dans les décisions d'utilisation de fongicides des agriculteurs.

Nous supposons que l'anticipation de la nuisibilité l'année  $t$ ,  $an_t$ , est une somme pondérée des nuisibilités des années  $t$  et  $t-1$  avec  $an_t = q_n n_t + (1 - q_n) n_{t-1}$  où le poids  $q_n$  est compris entre 0 et 1. Comme c'est souvent le cas dans les modèles économétriques employés par les économistes de la production agricole nous supposons que les anticipations des prix du blé,  $av_t$ , des agriculteurs sont adaptatives et décrites par l'équation d'ajustement  $av_t = q_v v_{t-1} + (1 - q_v) av_{t-1}$  qui implique que  $av_t = q_v [v_{t-1} + (1 - q_v) v_{t-2} + (1 - q_v)^2 v_{t-3} + (1 - q_v)^3 v_{t-4} + \dots]$ . Deux paramètres de pondération des anticipations de prix,  $q_{v(0)}$  et  $q_{v(1)}$ , sont estimés afin de tenir compte du changement dans la structure des marchés des grains survenu en 2007.<sup>17</sup>

Enfin, nous modélisons les utilisations de fongicides des

agriculteurs  $x_t$  en employant une forme fonctionnelle en les ( $an_t$ ,  $av_t$ ) similaire à celle des dépenses repères, avec  $x_t = b_1 + b_2 + an_t + b_3 av_t + b_4 av_t an_t$ . Les estimations des 8 paramètres  $q_n$ ,  $q_{v(0)}$ ,  $q_{v(1)}$  et  $b_1 - b_4$  sont obtenues par la méthode des moindres carrés en considérant les 18 points fournis par les observations des  $x_t$  et  $n_t$  sur la période 2003 – 2019 et les  $v_t$  sur la période 1993 – 2019.

Evidemment, le ratio nombre de paramètres sur nombre d'observation garantit ici une bonne qualité d'ajustement.<sup>18</sup> Mais nos paramètres d'intérêt ne sont ici que ceux des modèles d'anticipation des prix et des niveaux de nuisibilité. Ce sont les seuls paramètres dont l'estimation est nécessaire pour nos calculs de comparaison des utilisations de fongicides des agriculteurs par rapport à celles recommandées par Arvalis.

Le paramètre des anticipations de prix correspondant à la période 2003-2007,  $q_{v(0)}$ , est estimé à 0.79, celui correspondant à période 2008-2019,  $q_{v(1)}$ , est estimé à 0.45. Ces estimations indiquent que les anticipations des prix dépendent fortement des prix passés récents pour la période 2003 – 2007 alors qu'elles dépendent des prix passés récents et relativement lointains pour la période 2008 – 2019. Ceci peut s'expliquer par le fait que les prix des grains étaient moins volatiles jusqu'en 2006 qu'ils ne le sont depuis 2007. Le paramètre de pondération des anticipations des niveaux de nuisibilité,  $q_n$ , est estimé à 0.67, indiquant que les utilisations de fongicides des agriculteurs dépendent significativement de la nuisibilité observée l'année considérée.<sup>19</sup>

Si les paramètres  $q_{v(1)}$  et  $q_n$  sont estimés relativement précisément, la précision d'estimation du paramètre  $q_{v(0)}$  est bien moindre, avec des écarts-types estimés d'estimation respectifs de 0.44, 0.18 et 0.11 pour  $q_{v(0)}$ ,  $q_{v(1)}$  et  $q_n$ . Il convient donc d'interpréter avec prudence nos résultats pour les années 2003 – 2007. Néanmoins, les principaux résultats présentés par la suite sont robustes vis-à-vis des hypothèses

<sup>17</sup> Déflater le prix du blé par l'indice de prix des fongicides affecte légèrement les estimations des paramètres mais sans modifier nos principaux résultats. Nous avons décidé de présenter les résultats obtenus à partir des prix courants du blé, c'est-à-dire en négligeant les variations des prix des fongicides, parce que les préconisations d'Arvalis ne tiennent pas compte des prix des fongicides, ces derniers n'ayant connu que de très modestes variations (surtout en comparaison des prix des grains).

<sup>18</sup> Nos résultats d'estimation confirment l'adaptation des choix des agriculteurs au risque auquel ils font face. Le coefficient de corrélation linéaire estimé entre les utilisations de fongicides  $x_t$  est de 0.72 avec les prix anticipés estimés ( $av_t$ ), de 0.73 avec les niveaux de nuisibilité anticipés estimés ( $an_t$ ) et de 0.87 avec les niveaux de nuisibilité anticipés en valeur estimés ( $av_t an_t$ ). La corrélation élevée entre les prix anticipés et les utilisations de fongicides est probablement due à la forte corrélation (certainement fortuite) entre les niveaux de nuisibilité et de prix sur la période 2003 – 2019.

<sup>19</sup> Tout au moins des informations disponibles à propos de cette nuisibilité.

sur les formes fonctionnelles des anticipations de prix et de nuisibilité d'une part, et de l'utilisation des fongicides en fonction de ces anticipations d'autre part.

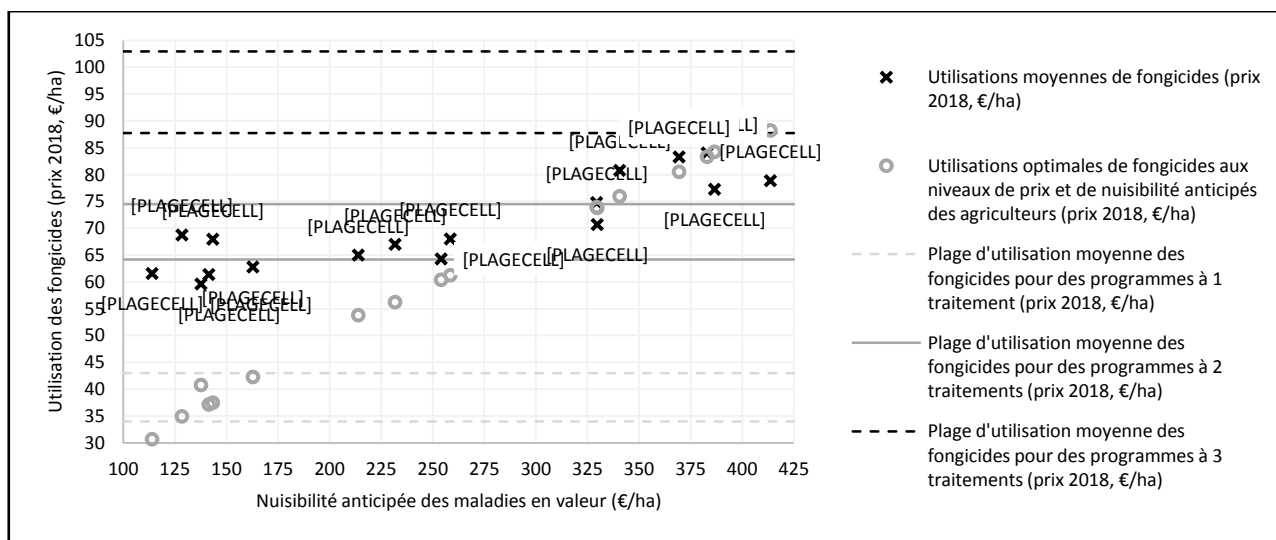
### **3.3. Comparaison des utilisations de fongicides des agriculteurs et des utilisations optimales correspondantes**

La Figure 3 compare les utilisations moyennes de fongicides des producteurs de blé tendre,  $x_t$ , et les utilisations de fongicides optimales d'un strict point de vue technico-économique correspondant aux anticipations des agriculteurs calculées à partir de la fonction des dépenses repères  $x^o(n,v)$ , avec  $x^o_t = x^o(an_t, av_t)$ . Les séries des  $x_t$  et  $x^o_t$  sont décrites dans cette figure comme des fonctions des niveaux de nuisibilité anticipés en valeur ( $av_t, an_t$ ).

La linéarité en  $n$  et  $v$  des dépenses repères implique que utilisations de fongicides optimales correspondant aux nuisibilités moyennes en valeur sont proches des utilisations optimales moyennes correspondant aux nuisibilités en valeur anticipées par les agriculteurs.<sup>20</sup> Par conséquent, les utilisations optimales et les utilisations des agriculteurs considérées dans la Figure 3 peuvent être directement comparées.

---

<sup>20</sup> Dès lors qu'on considère que les prix et la nuisibilité des maladies du blé sont indépendants.



**Figure 3** – Comparaison des utilisations moyennes et optimales de fongicides sur le blé tendre en fonction des niveaux de prix et de nuisibilité anticipés (2003 – 2019, France)

La Figure 3 montre que les utilisations de fongicides des agriculteurs varient de 60€/ha à 84€/ha en fonction des anticipations de la nuisibilité en valeur des maladies, ces dernières variant de 115 à 382€/ha sur la période 2003 – 2019.

La figure 3 illustre également de manière limpide deux caractéristiques des utilisations de fongicides des agriculteurs. Les utilisations des fongicides des agriculteurs sont proches des utilisations économiquement optimales lorsque les risques de maladies sont moyens ou élevés. Par exemple, en 2012 la nuisibilité anticipée estimée est d'environ 330€/ha. L'optimum technico-économique d'utilisation des fongicides se monte à 74€/ha, soit un programme à 2 traitements, et l'agriculteur français moyen utilise 75€/ha de fongicides.

Mais les utilisations de fongicides des agriculteurs tendent à excéder significativement les quantités optimisant leur revenu espéré en cas de risque économique faible. Par exemple, la nuisibilité anticipée des maladies ne se monte qu'à environ 135€/ha en 2011, ce qui ne justifie que l'utilisation de 41€/ha de fongicides pour l'optimisation de la marge anticipée, soit un programme à 1 traitement. Les utilisations de fongicides de l'agriculteur français moyen s'élèvent à 59€/ha en 2011, ce qui excède l'optimum technico-économique de 18€/ha. Ces 18€/ha correspondent à un traitement à dose réduite.

Ces observations semblent difficilement compatibles avec la TUE. En effet, elles suggèrent que les agriculteurs font des choix très averses au risque lorsque le risque économique est faible en moyenne alors qu'ils font des choix neutres au risque en cas de risque élevé en moyenne. Même en tenant compte de ce que le contrôle des dommages dus aux maladies décroît très vite lorsque l'utilisation des pesticides diminue, ces observations ne sont en phase avec la TUE que si (a) la variabilité des niveaux de nuisibilité des maladies est quasi-nulle ou/et (b) l'aversion au risque des agriculteurs devient quasi-nulle en cas de niveaux élevés de nuisibilité attendue. Aucune de ces deux conditions ne paraît vraisemblable.

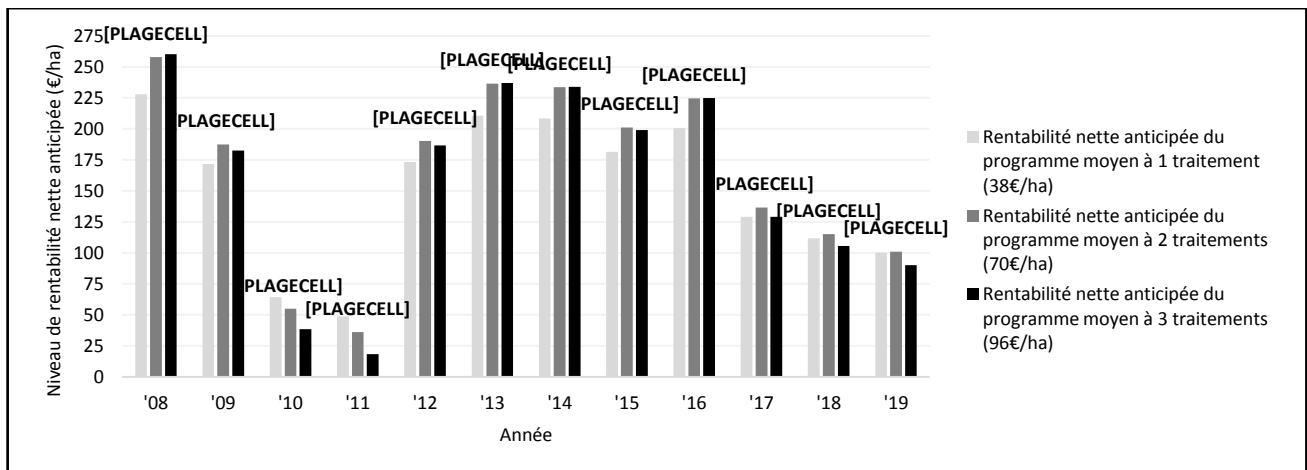
Considérés conjointement les résultats présentés dans les Figures 3 et 4 et ceux présentés dans la section précédente apportent des explications potentielles, plutôt convaincantes, aux mécanismes de choix observés ici.

La Figure 3 montre tout d'abord que les utilisations

moyennes de fongicides des agriculteurs sont proches des utilisations moyennes de programmes à 2 traitements. Ces utilisations s'approchent de celles de programmes à 3 traitements en cas de niveaux élevés de nuisibilité des maladies. En revanche, les utilisations moyennes de fongicides demeurent très éloignées de celles de programmes à 1 traitement lorsque les niveaux de nuisibilité anticipés sont faibles, voire très faibles.

La Figure 4 montre qu'un programme à 2 traitements est souvent optimal aux niveaux de nuisibilité moyens observés en France sur la période 2008 – 2019.<sup>21</sup> En outre son niveau de rentabilité anticipé est toujours proche de celui du programme optimal, que ce programme optimal soit à 1 ou 3 traitements.

<sup>21</sup> La période 2003 – 2007 n'est pas considérée ici en raison des changements intervenus sur les marchés des grains depuis 2007.



**Figure 4** – Rentabilité nette espérée des programmes de protection fongicide moyens à 1, 2 et 3 traitements sur blé tendre en France pour la période 2003 – 2019\*

\* Le chiffre au-dessus des barres de l’histogramme indique le nombre de traitements du programme moyen optimal d’un strict point de vue économique.

Le « producteur français moyen » de blé tendre semble donc articuler ses décisions de traitement autour d’un programme à 2 traitements. Il semble enclin à mettre en œuvre un troisième traitement, non prévu *a priori*, lorsque l’impact économique des niveaux de nuisibilité anticipés s’avère *in fine* plus élevé qu’attendu. Dans ces cas, il choisit des quantités de fongicides proches des quantités optimales d’un strict point de vue technico-économique. En revanche, il semble réticent à faire l’impasse sur un des deux traitements prévus *a priori* lorsque l’impact économique des niveaux de nuisibilité anticipés des maladies pourraient *in fine* le permettre d’un strict point de vue technico-économique.

Les interprétations données ci-dessus sont cohérentes avec les résultats théoriques de cet article, ce qui suggère que le « producteur français moyen » de blé tendre a un comportement que l’on peut qualifier d’averse aux pertes au sens de la TP. L’agriculteur semble choisir ses traitements de référence et les traitements qu’il met réellement en œuvre selon les mécanismes décrits par Kőszegi et Rabin (2007). Bien entendu, nos résultats empiriques ne prouvent pas la validité de nos résultats théoriques. Ces résultats empiriques sont seulement conformes aux prédictions de la TP complétée par Kőszegi et Rabin (2007) tout en paraissant incompatibles avec celles de la TUE.

Quelle que soit leur interprétation, nos résultats empiriques tendent à prouver que la grande majorité des traitements fongicides mis œuvre par le « producteur français moyen » de blé tendre sont justifiés d’un strict point de vue technico-économique. Cet agriculteur moyen ne manifeste un comportement d’auto-assurance « évident » qu’en 2003 – 2006, 2010 et 2011, les années durant lesquelles le niveau anticipé de la nuisibilité des maladies du blé a été le plus faible sur la période 2003 – 2019. En outre, étant donné qu’un programme à deux traitements procure toujours un retour sur investissement proche du programme optimal, même des agriculteurs très modérément averses aux pertes peuvent refuser de se contenter d’un seul traitement en cas de faible risque de maladies.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Pannell *et al* (2000) ont mis en évidence la relative invariance des fonctions de profit espéré (et d’utilité espérée) par rapport à certaines variables de

## REMARQUES CONCLUSIVES

Nos résultats tendent à souligner plusieurs aspects de la protection fongicide chimique du blé. Tout d’abord, les agriculteurs emploient les fongicides disponibles sur le marché parce que l’utilisation de ces intrants accroît significativement leurs revenus en moyenne. La rentabilité des fongicides pour la protection du blé provient de leur rapport coût sur efficacité, en particulier lorsqu’ils sont employés dans des systèmes de production spécialisés et au sein d’itinéraires techniques ciblant de hauts niveaux de rendement (et lorsque le prix des cultures à protéger est relativement élevé). De fait, les agriculteurs ont des utilisations de fongicides proches de l’optimum économique en cas de nuisibilité anticipée des maladies moyenne ou élevée.

Bien entendu, les approches prophylactiques pour la gestion des maladies du blé permettent de réduire la pression de ces maladies (*e.g.*, Arvalis, 2019). Mettre en œuvre ces approches diminue l’intérêt des traitements fongicides, ce qui est leur objectif, et, par là-même, peut réduire le niveau de protection chimique de référence des agriculteurs. Nos résultats montrent que ceci pourrait sensiblement impacter la mécanique des choix de traitement fongicide des agriculteurs.

En effet, les apports récents de la psychologie des décisions économiques fournissent des explications convaincantes au fait souvent observé selon lequel les agriculteurs semblent réticents à faire des impasses de traitement en cas de risque faible. Les agriculteurs tendent à considérer comme acquis, car généralement économiquement rentables, des niveaux de protection fongicide du blé relativement élevés. Dans ce

décision en production agricole. Nos résultats confirment cette conclusion pour ce qui concerne la relative invariance de la rentabilité espérée de la protection fongicide du blé, cette dernière étant comprise entre 133€/ha et 141€/ha pour des programmes de protection standards à 1, 2 ou 3 traitements si on considère la distribution des nuisibilités moyennes observées en France entre 2007 et 2018. Pannell *et al* (2000) soulignent également le fait que considérer des critères intégrant des mesures d’aversion face au risque, au sens de la TUE, modifie peu le niveau optimal des variables de décision qu’ils considèrent par rapport au niveau maximisant le profit espéré. Nos résultats montrent que considérer la TP et les traitements multiples de fongicides jouent un rôle crucial pour l’analyse de la protection fongicide des producteurs français de grandes cultures.

contexte, réduire le niveau de protection fongicide en cas de risque fongique faible est tentant mais difficile. Une impasse de traitement permet de réaliser des économies de pesticides mais constitue une prise de risque par rapport à la stratégie de protection habituelle qui est difficile à assumer.

De fait, ces résultats soulignent le rôle des aspects psychologiques des décisions de protection des cultures des agriculteurs. En particulier, ils mettent en évidence un intérêt potentiel des BSV et des outils d'aide à la décision. En fournissant régulièrement de l'information sur l'état sanitaire des parcelles, ces sources d'information peuvent amener les agriculteurs à modifier progressivement, en cours de campagne, leur perception du risque phytosanitaire auquel ils sont exposés. Par là-même, ces informations peuvent contribuer à ce que les agriculteurs modifient leurs décisions de traitement de référence. En cas de risque faible, cette

modification de la décision de référence peut faciliter la décision de ne pas mettre en œuvre un traitement prévu avant la réception des informations fournies mais remis en cause après leur réception.

Il convient néanmoins d'interpréter nos résultats avec prudence. En effet, nos résultats théoriques ont été obtenus sous des hypothèses très simplificatrices. Examiner la validité de ces résultats sous des hypothèses plus générales augmenterait leur portée. De même, nos résultats empiriques reposent sur une série de longueur limitée de données très agrégées. Disposer de données plus désagrégées, voire micro-économiques, nous permettrait d'examiner, voire de tester, la validité de nos résultats théoriques sur des bases statistiques plus solides.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antle J.M., 1983. Sequential decision making in production models. *American Journal of Agricultural Economics* 65(2):282–290.
- Antle J.M., Hatchett S.A., 1986. Dynamic Input Decisions in Econometric Production Models. *American Journal of Agricultural Economics* 68(4):939-949.
- Arvalis Institut du Végétal, 2019. *Céréales à paille. Interventions de printemps. Synthèse nationale 2019*. Collection Choisir & Décider. Ed. Arvalis Institut du Végétal.
- Arvalis Institut du Végétal, 2017. *Céréales à paille. Interventions de printemps. Synthèse nationale 2017*. Collection Choisir & Décider. Ed. Arvalis Institut du Végétal.
- Aubertot J.-N. et al, 2006. *Pesticides, Agriculture and the Environment: Reducing the Use of Pesticides and Limiting their Environmental Impact*. Paris: Ed. INRA.
- Babcock B.A., 2015. Explaining anomalous crop insurance purchase decisions using Prospect Theory. *American Journal of Agricultural Economics* 97(5):1371-1385.
- Barberis N.C., 2013. Thirty Years of Prospect Theory in Economics: A Review and Assessment. *Journal of Economic Perspectives* 27(1):173-96.
- Bocquého G., Jacquet F., Reynaud A., 2009. Expected Utility or Prospect Theory Maximisers? Assessing Farmers' Risk Behaviour from Field-Experiment Data. *European Review of Agricultural Economics* 41(1):135–72.
- Bürger J., de Mol F., Gerowitt B., 2012. Influence of cropping system factors on pesticide use intensity – A multivariate analysis of on-farm data in North East Germany. *European Journal of Agronomy* 40:54-63.
- Carpentier A., Reboud X., 2018. Why farmers consider pesticides the ultimate in crop protection: Economic and behavioral insights. *International Conference of Agricultural Economics*. Vancouver, BC. July 2018.
- Carpentier A. et al, 2005 Aspects économiques de la régulation des pollutions par les pesticides. Chapitre 5, *Rapport pour le MAP et le MEDDAD de l'Expertise Collective INRA/CEMAGREF « Pesticides, agriculture et environnement »* Ed. INRA.
- Feder G., 1979. Pesticides, information, and pest management under uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics* 61(1): 97-103.
- Jørgensen L.N. et al, 2008. Problems with disseminating information on disease control in cereals to farmers. *European Journal of Plant Pathology* 121:303-312.
- Kahneman D., 2011. *Thinking Fast and Slow*. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Kahneman D., Tversky A., 1979. Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk. *Econometrica* 47(2):263–92.
- Kőszegi B., Rabin M., 2009. Reference-Dependent Consumption Plans. *Amer. Econ. Rev.* 99(3):909-936.
- Kőszegi B., Rabin M., 2007. Reference-Dependent Risk Attitudes. *Amer. Econ. Rev.* 97(4):1047-1073.
- Lamine C., 2011. Anticiper ou temporiser. Injonctions environnementales et recompositions des identités professionnelles en céréaliculture. *Sociologie du travail* 53(1):75-92.
- Leathers H., Quiggin J., 1991. Risk Attitudes and Policy Interactions. *American Journal of Agricultural Economics* 73(3):757-764.
- Pannell D.J., 1991. Pests and pesticides, risk and risk aversion. *Agricultural Economics* 5:361-383.
- Pannell D.J., Malcolm B., Kingwell R.S., 2000. Are we risking too much? Perspectives on risk in farm modelling. *Agr. Econ.* 23:69-78.
- Rabin M., 2000. Risk aversion and expected-utility theory: a calibration theorem. *Econometrica* 68(5):1281-1292.
- Segal U., Spivak A., 1990. First order versus second order risk aversion. *Journal of Economic Theory* 51(1): 111-125.
- Sexton S.E., Lei Z., Zilberman D., 2007. The Economics of Pesticides and Pest Control. *International Review of Environmental and Resources Economics* 1:271-326.
- Skevas T., Oude Lansink A.G.J.M., Stefanou S.E., 2013. Designing the emerging EU pesticide policy: A literature review. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences* 64-65:95.103.
- Thaler R.H., 2016. *Misbehaving, the making of behavioural economics*. London, W.W. Norton & Cie.
- Wakker P., 2010. *Prospect Theory for Risk and Ambiguity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.