

## Réguler pour contrôler le développement de la résistance aux pesticides

### La durabilité de la sensibilité des bioagresseurs aux pesticides et aux variétés résistantes

*L'utilisation de pesticides et l'introduction de variétés résistantes à certains bioagresseurs (insectes, champignons, virus, bactéries) en agriculture exercent une pression de sélection sur ces populations de bioagresseurs. Au cours du temps, l'efficacité de ces technologies peut diminuer si des résistances (aux pesticides ou aux variétés résistantes) se développent. La durabilité des pesticides et des variétés résistantes est donc en grande partie tributaire de leur utilisation. Plus une technologie est utilisée de façon systématique et intensive, plus la pression sélective est forte, plus vite le gène de résistance dans la population de bioagresseurs est sélectionné, et plus rapidement la technologie devient obsolète. La gestion durable des résistances requiert une utilisation parcimonieuse des moyens de prévention qui n'est pas nécessairement compatible avec les intérêts économiques à court terme des utilisateurs. D'un point de vue économique, la sensibilité des bioagresseurs aux pesticides (ou aux résistances variétales) est une ressource naturelle. Les stratégies de gestion durable des résistances ont pour but de l'extraire de manière optimale au cours du temps, c'est-à-dire de retarder le développement de l'adaptation de ces populations de bioagresseurs.<sup>1</sup> Afin de contrôler le développement de la résistance aux pesticides, le « régulateur » a à sa disposition différents instruments de politique environnementale. Notre étude permet de mieux appréhender les déterminants de l'arbitrage entre deux de ces instruments, la zone refuge obligatoire et la taxe sur les pesticides ou sur les semences des variétés résistantes. Un modèle bio-économique spatialement et temporellement explicite est utilisé pour comparer la performance des deux instruments selon diverses hypothèses sur la mobilité des insectes ravageurs. Cette analyse se situe dans le prolongement d'un exercice antérieur pluridisciplinaire de simulations bio-économiques sur l'exemple de la pyrale du maïs (Vacher et al., 2007).*

Si de nombreux cas d'adaptation de bioagresseurs à des pesticides ou à des variétés résistantes ont déjà été identifiés, la question de la gestion durable des résistances a eu un regain d'intérêt avec l'avènement des variétés transgéniques dites « *Bt* » commercialisées aux Etats-Unis à partir du milieu des années 1990. Ces variétés de maïs et de coton ont été obtenues en incorporant dans la plante des toxines de la bactérie *Bacillus Thuringiensis* (*Bt*) qui les rendent résistantes à des insectes ravageurs de ces

cultures. La commercialisation de ces variétés a suscité de vives réactions d'environnementalistes et d'agriculteurs biologiques inquiets de la perte d'efficacité des toxines *Bt* (qui sont utilisées en épandage en agriculture biologique), ainsi que de scientifiques alertant sur la forte pression sélective exercée par les variétés *Bt*. Suite à ce débat, les Etats-Unis ont introduit la première réglementation obligatoire à grande échelle sur la gestion durable des résistances avec la politique des zones refuges. Cette réglementation

1. Selon cette définition, la durabilité vise à préserver plus longtemps la ressource naturelle qu'est la sensibilité des populations de bioagresseurs aux technologies de contrôle, donc à prolonger l'efficacité de l'innovation (pesticide ou variété résistante). Cette définition de la durabilité ne prend pas en compte les éventuels effets de l'innovation sur la santé ou l'environnement et ne recoupe donc pas celle du développement durable au sens le plus classique du terme (si jamais un pesticide a un effet négatif sur la santé, une gestion durable des résistances qui prolonge l'efficacité de ce pesticide conduit à faire perdurer cet effet négatif).

a été mise en place par l'*Environmental Protection Agency* (EPA). Elle oblige les producteurs de maïs et de coton *Bt* à semer de 20 % à 50 % de cette culture en variétés non *Bt*. Ces zones fournissent un « refuge » aux insectes ravageurs vulnérables aux toxines *Bt* qui, en se développant et en s'accouplant avec les insectes résistants, ralentissent la sélection du gène de résistance aux toxines *Bt* (Bourguet et al. 2005).

La mise en place de cette réglementation de grande ampleur a conduit à des études chiffrées sur la biologie et l'économie de ces zones refuges pour les cultures *Bt*. Au-delà de ces cas précis, on assiste à un regain de l'activité scientifique sur les questions plus générales touchant à la gestion durable des résistances. Notre étude s'inscrit dans ce cadre, en étudiant, à partir de l'exemple des plantes *Bt*, la question des réglementations à mettre en place pour encadrer l'utilisation de pesticides ou de variétés résistantes afin de retarder l'apparition d'insectes résistants d'une manière économiquement souhaitable.

### **La sensibilité des bioagresseurs aux pesticides, une ressource commune en libre accès**

Pourquoi doit-on réglementer pour gérer au mieux le développement de résistances aux pesticides ? L'agriculteur étant le premier à souffrir de la perte d'efficacité d'un pesticide, on pourrait s'attendre à ce qu'il l'utilise au mieux pour ralentir ce phénomène. Ce n'est pas le cas, parce qu'il n'est pas le seul à épandre le pesticide. Comme les insectes se déplacent d'une exploitation à l'autre, la résistance des bioagresseurs présents dans son exploitation dépend aussi de l'usage que font ses voisins de ce pesticide. Cette dépendance crée une externalité entre agriculteurs, au sens économique du terme.

D'un point de vue conceptuel, la sensibilité à un pesticide dans le patrimoine génétique d'une population de ravageurs a les caractéristiques d'une ressource naturelle en libre accès. Les agriculteurs prélèvent cette ressource en épandant le pesticide. La sensibilité au pesticide varie d'une année à l'autre selon l'évolution de la population d'insectes et de son patrimoine génétique. Ces deux variables, population d'insectes et proportion de gènes de résistance, sont affectées par l'utilisation des pesticides. Le problème est similaire à celui de la « tragédie des communs » : chaque agriculteur, en ignorant l'impact de son choix de lutte contre les bioagresseurs sur les autres exploitants, a tendance à surexploiter la ressource. Le laisser-faire mène alors à un prélèvement de la sensibilité au pesticide plus rapide que souhaitable. Ce prélèvement accéléré se fait au détriment de tous les agriculteurs : ils auraient tous à gagner à ralentir l'extraction de la sensibilité par une meilleure utilisation des pesticides. Une réglementation adéquate peut contribuer à mieux gérer la résistance aux pesticides pour le bénéfice de tous les agriculteurs.

### **La zone refuge obligatoire ou la taxation des semences : régulation versus instrument économique**

C'est dans cet esprit que l'EPA a introduit la zone refuge obligatoire, qui oblige chaque producteur *Bt* à semer des

variétés non *Bt* sur une partie de son exploitation. Selon la terminologie usuelle de l'économie de l'environnement, il s'agit d'une politique environnementale de régulation dite de « command-and-control », parce qu'elle contraint chaque producteur directement sur son choix technologique (ici la fraction minimale de culture dédiée à la zone refuge) et repose sur le contrôle par le régulateur du respect de cette règle. L'avantage d'une régulation de ce type est celui de la précision pour le régulateur, qui contrôle directement les paramètres importants que sont la taille et la localisation des zones refuges. Son inconvénient est d'être moins flexible que les instruments économiques tels que les taxes et les permis d'émissions échangeables. Cette autre catégorie de politiques environnementales laisse plus de liberté aux producteurs sur leur réponse à adopter face à la contrainte environnementale.

Une autre manière de maintenir des zones plantées en variétés conventionnelles serait, par exemple, de décourager l'adoption de semences *Bt* en imposant une taxe sur ces semences. Cet instrument économique présente l'avantage de laisser le choix aux agriculteurs, donc de s'adapter aux conditions physiques, climatiques et techniques de chacun. L'adoption de variétés *Bt* serait découragée pour les agriculteurs les moins touchés par les bioagresseurs cibles, les conduisant à semer des variétés conventionnelles qui serviraient de zones refuges naturelles aux agriculteurs faisant face à de fortes attaques de bioagresseurs. La théorie économique met en avant la dominance des instruments économiques pour l'exploitation de ressources naturelles en libre accès car ils s'adaptent aux caractéristiques des utilisateurs. Néanmoins, l'inconvénient ici est que le régulateur ne contrôle pas la localisation des refuges naturels induits par la taxe. Une mauvaise distribution de ces zones dans le paysage, loin des zones semées en *Bt*, les rend inopérantes si les insectes ne migrent pas entre les deux zones. La dominance des instruments de marché sur les instruments de régulation est remise en question lorsque la répartition spatiale de la ressource est importante, comme c'est le cas pour la sensibilité aux pesticides des bioagresseurs. Pour être en mesure de retarder la sélection des gènes de résistance, les zones refuges qui concentrent les gènes sensibles aux pesticides doivent être dispersées dans le paysage. Cette caractéristique rend le problème que nous étudions différent des exemples traités jusqu'ici dans la littérature sur la gestion d'une ressource naturelle pour laquelle la localisation est importante. Ainsi, pour la protection des espèces animales par exemple (éléphants, grand singes,...), une concentration des zones de protection en réserves naturelles de taille importante est plus adéquate (à l'inverse de la dispersion des zones refuges recherchée ici).

Notre étude (Ambec et Desquilbet, 2011) permet de mieux appréhender les déterminants de l'arbitrage entre ces deux instruments de politique environnementale, la zone refuge obligatoire et la taxe sur les semences OGM, pour la gestion durable de la sensibilité aux OGM pesticides. Un modèle bio-économique avec une double dimension spatiale et temporelle est utilisé pour comparer la performance des deux instruments selon diverses hypothèses sur la mobilité des insectes ravageurs (voir l'encadré).

### Un modèle centré sur la localisation spatiale des zones refuges et la mobilité des insectes

Le modèle économique développé dans Ambec et Desquilbet (2011) décrit le choix de culture, OGM *Bt* ou conventionnel, des agriculteurs, étant données les pertes de rendement causées par les insectes sur chaque exploitation. Le modèle biologique est suffisamment riche pour représenter ces pertes de rendement, qui dépendent de l'évolution de la population d'insectes ravageurs et de la proportion de gènes de résistance au sein de cette population. Ces deux variables constituent les variables d'état de notre système dynamique. Pour rester compréhensible, le modèle est aussi simple que possible sur les aspects économiques, temporels et spatiaux. Ainsi, le temps est réduit à deux périodes et l'espace à une dimension : les agriculteurs sont situés sur une ligne ou un cercle. A chaque période, le cycle biologique des insectes ravageurs est divisé en trois phases. Au cours de la première phase, les larves d'insectes naissent et se nourrissent sur la culture. Leur survie dépend du type de plante, conventionnel ou *Bt* : sur les champs plantés en *Bt*, seules les larves ayant deux gènes de résistance (de génotype « rr ») survivent. Lors de la deuxième phase, les larves se métamorphosent en papillons et se déplacent. L'importance de la migration de papillons entre deux exploitations diminue avec la distance entre ces exploitations. Enfin, la troisième phase est une phase de reproduction avec transmission de gènes et croissance de la population. De ces trois phases biologiques découlent deux équations dynamiques pour chaque exploitation agricole : une pour le nombre d'insectes et une pour la proportion d'insectes résistants. A la deuxième période, ces deux variables d'état dépendent des caractéristiques initiales de la première période, c'est-à-dire du nombre d'insectes et de la proportion d'insectes résistants, ainsi que du choix de variété de l'agriculteur mais également de ses voisins. Il s'agit donc d'un modèle économique avec externalité : le profit de chaque agriculteur dépend du nombre d'insectes et de la proportion d'insectes résistants sur son exploitation qui sont eux-mêmes affectés par les choix de variété des autres agriculteurs.

Dans une autre étude (Desquilbet et Herrmann, 2011), nous nous intéressons plutôt à l'aspect temporel de la politique des zones refuges, en cas de migration parfaite des insectes entre zone *Bt* et zone refuge. Cette étude s'intéresse à l'évolution optimale de la zone refuge obligatoire au cours du temps, ou autrement dit, à l'évolution du taux d'extraction optimale de la sensibilité de la population d'insectes au *Bt*. Un résultat important est que la trajectoire optimale de la politique des refuges dépend de manière importante de l'existence ou non d'un surcoût des semences *Bt*, une variable dont les effets n'ont pas été systématiquement étudiés dans la littérature antérieure. Nous mettons également en évidence l'importance d'une modélisation cohérente des effets des plantes *Bt* sur les populations d'insectes. L'incohérence entre certains résultats dans la littérature peut être en effet attribuée à des hypothèses inadéquates dans les modèles biologiques utilisés.

### Deux externalités des cultures *Bt*, négative sur le développement de la résistance, positive sur la taille de la population

A l'aide du modèle, nous comparons l'efficacité de la production sous trois régimes : le laisser-faire (pas de régulation), une zone refuge obligatoire et une taxe sur le maïs *Bt*. Cette comparaison est réalisée sous diverses hypothèses de mobilité des insectes et de dispersion spatiale de la population d'insectes. Le modèle permet de clarifier le sens des externalités dans l'utilisation des semences pesticides. En l'absence de mobilité des insectes d'une exploitation à l'autre, la production en laisser-faire est optimale. Si c'est efficace, l'agriculteur plantera de lui-même une partie de son exploitation en zone refuge afin de retarder la sélection du gène de résistance. L'intervention du régulateur ne se justifie donc que lorsque les insectes se déplacent d'une exploitation à l'autre. Dans ce cas, la décision de l'agriculteur de planter une zone refuge dans le but de ralentir le

développement de la résistance bénéficiera également à ses voisins. L'agriculteur sera cependant le seul à supporter l'investissement nécessaire.

Lorsque les insectes sont mobiles d'une exploitation à l'autre, le choix de variété pesticide par l'agriculteur engendre deux externalités sur ses voisins, chacune affectant une des variables d'état (population d'insectes et proportion de gènes de résistance). La première externalité, négative, est due à la sélection des gènes de résistance : plus l'agriculteur plante de semences *Bt*, plus élevée sera la proportion d'insectes résistants chez ses voisins. La seconde externalité, positive, est liée à la population d'insectes : en utilisant plus de variété *Bt*, un agriculteur réduit le nombre d'insectes présents dans son exploitation, donc la population migrant dans les champs de ses voisins. Les deux externalités impliquent que la situation en laisser-faire est inefficace (à moins que les deux externalités se neutralisent) et peut être améliorée par une politique publique.

### L'optimalité de la taxe si les insectes migrent sur de grandes distances

Nous considérons d'abord le cas d'insectes qui migrent sur de grandes distances. Cela se traduit dans le modèle par deux hypothèses. Premièrement, la dispersion des insectes ne dépend pas de la distance entre agriculteurs. Deuxièmement, les insectes migrent sur un territoire aux caractéristiques climatiques et biologiques diverses, avec des populations initiales d'insectes hétérogènes. Dans ce cas, la taxe (ou subvention) sur les semences *Bt* permet une gestion optimale de la résistance. En effet, alors que l'externalité négative sur le développement de résistance requiert une taxe sur les semences *Bt* pour être corrigée, l'externalité positive sur la diminution de la population d'insectes justifie de subventionner les semences *Bt*. Le choix d'une taxe ou d'une subvention dépend de l'importance relative de chaque externalité. Ce résultat est cohérent avec la théorie économique. Ici, la localisation spatiale des externalités est uniforme et les coûts d'opportunité des producteurs pour la réduction des externalités sont hétérogènes. La taxe est alors un instrument plus efficace pour réduire les externalités qu'une technologie de production imposée comme la zone refuge obligatoire.

### La préférence pour la zone refuge obligatoire si les insectes migrent sur de petites distances et si les agriculteurs sont tous identiques

Lorsqu'ils migrent sur de petites distances, les insectes qui quittent une exploitation vont principalement sur les exploitations voisines immédiates. Dans le modèle, nous supposons que la proportion d'insectes qui migrent d'une exploitation à l'autre est décroissante avec la distance. Pour simplifier, nous supposons alors que les agriculteurs font face à des caractéristiques climatiques et biologiques similaires, et donc à une même population initiale d'insectes à l'intérieur de la distance de migration. Dans ce cas, lorsque l'externalité négative liée au développement de la résistance domine, la zone refuge est une régulation efficace. La taxe permet également de produire efficacement seulement si chaque producteur anticipe l'impact de son choix de variétés sur le développement de la résistance sur son exploitation. Sous cette hypothèse comportementale, chaque agriculteur consacre de lui-même une partie de

son exploitation à la variété conventionnelle pour ralentir le développement de la résistance. La taxe détermine alors la taille de cette zone refuge initiée par l'agriculteur. Dans le cas où les agriculteurs négligent l'impact qu'ils ont sur le développement de gènes de résistance, la taxe ne permet pas de créer de telles zones refuges volontaires. Elles doivent donc être obligatoires.

### **Des agriculteurs hétérogènes et une mobilité imparfaite des insectes : pas de résultat tranché en faveur d'un instrument**

En dernier lieu, nous avons étudié le cas le plus général du modèle où les agriculteurs font face à des attaques hétérogènes d'insectes et où la mobilité de ces insectes est imparfaite. Les simulations, menées sous différentes hypothèses d'hétérogénéité entre agriculteurs et de mobilité des insectes, ne permettent pas de conclure de façon tranchée sur la dominance d'un des instruments en fonction des hypothèses sur ces deux variables. Ces simulations suggèrent donc qu'il est difficile d'inférer en général quels types de producteurs, parmi des producteurs hétérogènes, devraient planter plus de la variété pesticide que les autres, et quels types de producteurs devraient en planter moins. Elles indiquent également que la prescription de politique publique pour un degré donné d'hétérogénéité des produc-

teurs et de dispersion des insectes peut être différente si les agriculteurs sont myopes ou non, c'est-à-dire si chaque agriculteur est conscient ou non de l'impact de ses choix de culture sur le développement ultérieur de la population d'insectes et de la résistance sur sa propre exploitation.

### **Les leçons pour le régulateur**

Que peut-on retenir de cet exercice de modélisation des instruments de régulation dont le but est de gérer durablement l'utilisation des pesticides ? Premièrement, que le développement de la résistance aux pesticides n'est pas la seule externalité due à la mobilité des bio-agresseurs. Il ne faut pas oublier que l'épandage de pesticides sur une exploitation profite aux voisins car elle réduit la population de bioagresseurs dans les exploitations voisines. Cette externalité positive joue dans le sens contraire de l'externalité négative liée à l'épuisement de la sensibilité au pesticide dans le patrimoine génétique des bioagresseurs. Elle incite chaque exploitant à sous-utiliser les pesticides. La régulation doit en tenir compte en réduisant la taxe ou la zone refuge. Deuxièmement, le choix entre taxe ou zone refuge obligatoire dépend de la mobilité des insectes. Lorsque les insectes migrent sur de longues distances, la taxe est préférable. Dans le cas contraire d'une faible mobilité, qui caractérise par exemple la pyrale du maïs, la zone refuge est préférable.

**Stefan Ambec** (auteur de correspondance) INRA, UMR 1081 LERNA, F-31000 Toulouse, France.

[stefan.ambec@toulouse.inra.fr](mailto:stefan.ambec@toulouse.inra.fr)

**Marion Desquilbet** INRA, UMR 1291 GREMAQ, F-31000 Toulouse, France.

[Marion.Desquilbet@toulouse.inra.fr](mailto:Marion.Desquilbet@toulouse.inra.fr)

Cette recherche a été financée dans le cadre du projet CEDRE (Exploitation durable de résistances aux maladies chez les végétaux) de l'appel à projet 2005 du programme fédérateur ADD (agriculture et développement durable).

#### **Pour en savoir plus**

**Ambec S., Desquilbet M. 2011**, Regulation of a spatial externality: Refuges versus tax for managing pest resistance, *Environmental and Resource Economics*. A paraître (disponible en ligne).

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

**Desquilbet M., Hermann M. 2011**. Managing pest resistance to Bt crops: how should the refuge size be adjusted optimally over time? Document de travail.

**Vacher C., Bourguet D., Desquilbet M., Lemarié S., Ambec S., Hochberg M.E. 2006**, Fees or refuges: which is better for the sustainable management of insect resistance to transgenic Bt corn? *Biology Letters*, 2, 198-202.