

Le dispositif des zones refuges pour le maïs *Bt* aux États-Unis

par Denis Bourguet^a, Marion Desquilbet^b et Stéphane Lemarie^b

^a INRA, unité Génétique microbienne et Environnement, La Minière, 78285 Guyancourt cedex
bourguet@jouy.inra.fr

^b INRA, Économie et Sociologie rurales - université Pierre-Mendès-France, BP 47, 38040 Grenoble cedex 9
desquilbet@grenoble.inra.fr, lemarie@grenoble.inra.fr

Aux États-Unis, depuis 1996, des surfaces importantes sont cultivées avec des variétés transgéniques de coton, de pomme de terre et de maïs résistantes à des insectes ravageurs de ces cultures. La mise sur le marché de ces variétés transgéniques a été accompagnée par des réglementations pour contrôler les risques d'apparition d'insectes qui seraient eux-mêmes résistants aux plantes génétiquement modifiées. Selon ces réglementations, chaque agriculteur cultivant une variété transgénique résistante à un insecte doit utiliser une variété conventionnelle qui n'est pas résistante à cet insecte sur une partie de ses surfaces. Les surfaces plantées avec des variétés conventionnelles sont appelées « zones refuges ». Ces zones refuges visent à maintenir un réservoir d'insectes sensibles pour limiter les risques d'apparition de résistance chez les insectes cibles. Dans le cas du maïs auquel nous nous intéressons dans cet article, les variétés transgéniques actuellement commercialisées sont résistantes à la Pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis* (Lépidoptère Pyralidé)¹. Un dispositif équivalent vient d'être adopté aux États-Unis lors de la mise sur le marché de maïs transgéniques résistants à la Chrysomèle des racines du maïs, *Diabrotica virgifera virgifera* (Coléoptère Chrysomélidé)², un autre insecte causant des dégâts importants des cultures.

Le dispositif des zones refuges aux États-Unis constitue la première réglementation obligatoire et à grande échelle au niveau mondial pour gérer les risques d'apparition de résistance dans des populations d'ennemis des cultures. Il est donc intéressant de tirer les leçons de cette expérience américaine à l'heure où une levée du moratoire sur les organismes génétiquement modifiés (OGM) est d'actualité dans l'UE³. Une diffusion effective des OGM dans l'UE serait sans doute

accompagnée d'un renforcement des procédures de gestion des risques environnementaux liés à ces plantes. Ainsi, les actions de biovigilance qui sont déjà en place pourraient être renforcées. Ces actions reposent sur une surveillance à grande échelle des effets éventuels des OGM sur les écosystèmes (voir Chaufaux *et al.*, 2002). Au-delà de la biovigilance, il est possible que des réglementations équivalentes aux zones refuges aux États-Unis soient mises en place dans l'UE. Notons enfin que l'apparition de résistances chez les ennemis des cultures n'est pas spécifique aux organismes génétiquement modifiés (OGM). La question du contrôle des résistances chez les ennemis des cultures est donc importante pour l'agriculture européenne, quelles que soient les perspectives de développement des OGM.

Cet article présente d'abord les caractéristiques des maïs transgéniques résistants à la Pyrale du maïs et les perspectives concernant les maïs transgéniques résistants à la Chrysomèle des racines aux États-Unis. Il présente ensuite le dispositif des zones refuges en place dans ce pays dans le cas du maïs résistant à la Pyrale, en détaillant les raisons pour lesquelles ce dispositif a été mis en place, la définition des zones refuges, leur mise en place effective par les agriculteurs, et les procédures suivies pour détecter l'apparition de résistances dans les populations de pyrales.

Ravageurs du maïs et maïs transgéniques

La Pyrale du maïs

Aux États-Unis, comme en France, la Pyrale du maïs est un ravageur important du maïs. Ses larves occasionnent des dégâts variables suivant les régions et les conditions climatiques de l'année. Avant l'introduction des OGM, ses dégâts étaient contrôlés principalement en utilisant des insecticides chimiques, par l'emploi d'un champignon entomopathogène, par le lâcher de trichogrammes, ou encore par une modification des techniques culturales (semis plus tardifs, broyage des cannes...) (*cf in* Cabanettes et Mestres 1984 ; Kabiri *et al.*, 1991). Depuis l'évolution technologique du génie génétique, l'utilisation de maïs transgéniques peut venir compléter, voire remplacer, ces moyens de lutte contre l'insecte. En effet, les premières variétés de maïs transgénique produisent des toxines de la bactérie

¹ Sur HYPPZ, encyclopédie en ligne des ravageurs européens : www.inra.fr/hyppz/RAVAGEUR/3ostnub.htm

² À voir dans *Insectes* n°127, 2002.

³ En effet, le Parlement européen doit se prononcer prochainement sur deux projets de nouvelle réglementation, l'un concernant la mise sur le marché et l'étiquetage des OGM, l'autre concernant la traçabilité des OGM (projets sur lesquels les ministres de l'Agriculture et de l'Environnement des États Membres de l'UE sont parvenus à des accords en novembre et décembre 2002). La mise en place d'un tel cadre réglementaire avait été exigée en 1999 par les cinq États Membres (dont la France) qui étaient à l'origine du moratoire sur les nouvelles autorisations d'OGM.

Tableau I. Événements de transformation homologués par l'EPA en novembre 2002

Nom de l'événement de transformation	Nom de la marque commerciale	Nom de la toxine produite	Firme commercialisant l'événement	Année d'homologation de l'événement
Mon 810	Yieldgard®	Cry1Ab	Monsanto	1996
Bt 11	Yieldgard®	Cry1Ab	Syngenta	1996
TC 1507	Herculex®	Cry1F	Pioneer & Dow	2001

Bacillus thuringiensis (*Bt*), qui confèrent à ces nouvelles variétés une résistance vis-à-vis de la Pyrale du maïs (Decoin, 1998).

La communauté scientifique estime probable l'apparition de populations de Pyrale du maïs résistantes aux toxines produites par ces maïs *Bt*. L'une des raisons est que les plantes transgéniques actuelles n'expriment qu'une toxine, ce qui facilite l'apparition d'individus résistants. La seconde raison est que la pression de sélection sur les insectes est plus forte avec les plantes transgéniques que lors d'une pulvérisation de formulation contenant des cristaux et des spores de *Bacillus thuringiensis*.

Trois types de maïs OGM résistants à *O. nubilalis*, ou, plus précisément, trois événements de transformation, sont actuellement homologués aux États-Unis (voir encadré 1, ci-après). Les caractéristiques de ces trois événements de transformation sont résumées dans le tableau I. Par ailleurs, trois autres événements de transformation - qui ne figurent pas dans le tableau - avaient été homologués aux États-Unis mais ne le sont plus.⁴

L'évolution de la proportion des surfaces semées en maïs *Bt* (tous événements confondus) est indiquée dans le tableau II. Certaines variétés de maïs couplent un événement *Bt* et une résistance à un herbicide, mais ces variétés sont très peu diffusées. Par ailleurs, les données désagrégées par Etat montrent que la diffusion du maïs *Bt* peut dépasser 30%, mais reste toujours en dessous de 50%.

Ces données laissent penser que la diffusion du maïs *Bt* est proche d'un plafond situé entre 25 et 30% des

surfaces de maïs. Deux principales explications peuvent être apportées :
- comme la semence de maïs *Bt* est plus chère que la semence conventionnelle, l'adoption du maïs *Bt* est intéressante si la prévision d'attaque de la Pyrale du maïs dépasse un certain seuil. Or cet insecte ne constitue pas un véritable problème

agronomique pour de nombreux producteurs de maïs aux États-Unis (c'est également le cas en France) ;

- entre 1996 et 2001, la diffusion des semences *Bt* s'est accompagnée d'une réduction de la taille des populations d'*O. nubilalis*. Ceci a pu conduire les producteurs de maïs à relativiser l'intérêt de l'adoption du maïs *Bt*. Il est difficile de savoir s'il y a un lien de cause à effet entre la diffusion des maïs *Bt* et cette baisse des populations du ravageur (d'autant que ses populations ont été plus denses en 2002 qu'en 2001).

Tableau II. Évolution des surfaces de maïs semées avec des variétés de maïs *Bt*

Année	Maïs <i>Bt</i>	Maïs <i>Bt</i> et tolérant à un herbicide
1996	1%	0%
1997	6%	0%
1998	21%	4%
1999	25%	4%
2000	19%	2%
2001	18%	1%
2002	22%	2%

Source : USDA : jan.mannlib.cornell.edu/reports/nassr/field/pcp-bbp

La Chrysomèle du maïs

La Chrysomèle des racines du maïs est un autre ravageur majeur du maïs aux États-Unis, où il cause des dégâts plus importants que la Pyrale du maïs. Il est à noter que, jusqu'à récemment, ce ravageur n'était pas présent en Europe. Cependant, il a été observé en Serbie en 1992, et il vient d'être détecté en France dans des pièges disposés autour des aéroports du Bourget et de Roissy (Reynaud, 2002). Aux États-Unis, les pertes de rendement dues à *D. virgifera virgifera* ont conduit les agriculteurs à une utilisation intensive d'insecticides chimiques. L'apparition de chrysomèles résistantes aux cyclodiènes dans les années 1950 puis aux organophosphorés et aux carbamates dans les années 1990 a rendu l'utilisation de ces molécules insecticides peu efficace (Scharf *et al.*, 2001).

⁴ Le premier est l'événement 176 de Ciba/Novartis et Mycogen codant la toxine Cry1Ab de *Bt* (cet événement est toujours homologué en France). Le second est l'événement DBT418 de DeKalb codant la toxine Cry1Ac de *Bt*. Pour ces deux événements, l'homologation expirait en 2001 et les firmes qui le commercialisaient n'ont pas demandé son renouvellement pour des raisons commerciales (événements peu concurrentiels). Le troisième événement qui n'est plus homologué est l'événement CBH-351 (Starlink®) d'Aventis Crop Science (actuellement Bayer Crop Science) codant la toxine Cry9C de *Bt*. Son homologation avait été accordée en 1998 pour l'alimentation animale et les usages industriels, mais pas pour l'alimentation humaine. Elle a été volontairement annulée par Aventis en 2001 suite à un scandale aux États-Unis, après la découverte de cet événement dans des produits destinés à l'alimentation humaine.

Encadré 1. L'obtention d'une variété OGM

Une variété OGM est élaborée en deux étapes. La première étape est la construction d'un événement de transformation. Il s'agit d'introduire, en laboratoire, une série de gènes provenant d'autres espèces, dans une plante. Les transformations réussies sont appelées événements de transformation. Les événements de transformation sont retenus si le caractère qui résulte de l'expression des gènes introduits présente une bonne valeur technique (par exemple, une bonne résistance à un insecte). Les plantes ainsi transformées ne possèdent pas pour autant de bonnes caractéristiques agronomiques. La deuxième étape consiste donc à introduire l'événement de transformation dans des variétés élites. Cette étape est réalisée par les semenciers sur la base de schémas conventionnels d'amélioration des plantes. Le même événement de transformation peut ainsi être introduit dans un large éventail de variétés adaptées, par exemple, à différentes conditions climatiques. Il se peut *in fine* qu'un semencier propose dans son catalogue plusieurs versions d'une même variété, avec ou sans les différents événements de transformation disponibles pour cette espèce (résistance à tel ou tel insecte, tolérance à un herbicide).

La découverte de toxines de *Bt* actives contre ce ravageur a conduit au développement de maïs transgéniques produisant ces toxines. Les traitements insecticides utilisés contre la Chrysomèle du maïs étant peu efficaces, la mise sur le marché des variétés de maïs résistantes à ce ravageur devrait engendrer une augmentation significative des surfaces semées en maïs *Bt*. Notamment, un événement de transformation développé par Monsanto a été homologué par l'Environmental Protection Agency (EPA) en 2003.⁵ Cet événement produit une toxine de *Bt* active contre *D. virgifera virgifera*. Ici aussi, l'événement de transformation conduit à la production d'une seule toxine, ce qui peut favoriser l'apparition de chrysomèles résistantes. Des variétés de maïs *Bt* permettant de contrôler à la fois la Pyrale et la Chrysomèle du maïs devraient également voir le jour en 2003. Ces maïs pourront aussi contenir une résistance à un herbicide.

Le dispositif de contrôle des résistances

Aux États-Unis, l'EPA (l'Agence de protection de l'environnement) est actuellement en charge du contrôle des résistances aux plantes transgéniques chez les ennemis des cultures, dans le cadre de sa juridiction sur les pesticides. L'EPA est intervenue sur cette question à partir de 1992, suite aux réactions de plusieurs scientifiques et de certaines organisations

⁵ Il s'agit de l'événement Mon 863, produisant la toxine de *Bt* Cry3Bb1. La dose de toxine produite par cet événement n'engendre que 40 à 50% de mortalité mais assure une protection efficace du maïs contre ce ravageur.

environnementalistes. L'intervention publique est légitimée par le caractère de « biens publics » des toxines de *Bt* employées pour la maîtrise des ravageurs des cultures. Plus exactement, l'apparition d'une résistance aux toxines de *Bt* peut avoir deux effets jugés négatifs par l'EPA. Tout d'abord, elle peut affecter les agriculteurs biologiques qui utilisent des « biopesticides » dont les formulations contiennent ces mêmes toxines. Ensuite, elle conduirait certainement à revenir à un usage plus important d'insecticides, considérés plus dangereux pour l'environnement et la santé que les toxines de *Bt*.

Nous présentons ici les grandes lignes du dispositif actuel de contrôle des résistances. Ce dispositif est défini en détail dans un document de l'EPA (2001). Il présente quatre composantes : une définition des zones refuges, des mesures pour encourager et pour évaluer la mise en œuvre effective par les agriculteurs, un suivi de la résistance dans les populations de Pyrale du maïs, et un dispositif d'urgence à appliquer en cas d'apparition de pyrales résistantes.

Les caractéristiques des zones refuges

La stratégie « haute dose / refuge » retenue dans le cas des plantes *Bt* aux États-Unis est l'une des méthodes les plus connues pour freiner le développement de résistance dans les populations de ravageurs (*cf in* Réjasse *et al.*, 2000). Elle consiste à coupler des parcelles de maïs *Bt* produisant une grande quantité de toxines

Encadré 2. La stratégie dose élevée/refuge

Chaque pyrale a deux gènes de sensibilité au maïs *Bt*, un reçu de chaque parent. Chaque gène confère soit un caractère de sensibilité à la toxine de *Bt* (que nous appellerons S), soit un caractère de résistance (que nous appellerons R). Selon les gènes reçus de ses parents, une pyrale donnée est donc de type SS, RS ou RR. On s'attend à ce que le maïs *Bt* tue toutes les larves SS et presque toutes les larves RS, mais soit sans effet sur les larves RR.

S'il n'y a pas de refuge à proximité des champs *Bt*, les papillons RR et RS issus des larves qui ont survécu sur les maïs *Bt* risquent de s'accoupler entre eux. Les descendance de tels croisements comportent inévitablement des individus avec deux gènes de résistance (c'est-à-dire de type RR). Le maïs *Bt* serait sans effet sur ces pyrales, ni sur leur descendance si elles s'accouplent entre elles.

En présence d'un refuge à proximité des champs de *Bt*, le refuge produira un grand nombre de pyrales dont la plupart seront sensibles à la toxine de *Bt*. Si quelques insectes RS ou RR survivent dans les champs transgéniques, il y a alors une grande probabilité pour qu'ils s'accouplent avec des insectes du refuge sensibles à la toxine de *Bt*. Leur descendance sera alors soit de type RS, soit de type SS. Mais aucun descendant ne sera de type RR. Les individus SS seront tués sur les champs transgéniques ainsi que la plupart des individus RS.

avec des parcelles de maïs non-*Bt* (appelées zones refuges) où les larves d'*O. nubilalis* ne seraient pas exposées à la toxine, ces dernières préservant ainsi un réservoir d'individus sensibles (Alstad et Andow, 1995). Les arguments scientifiques justifiant cette stratégie sont présentés succinctement dans l'encadré 2.

La mise en place de ces zones refuges est devenue obligatoire en 2000. L'EPA a défini leurs caractéristiques en se basant sur de nombreuses études sur la biologie de la Pyrale du maïs menées entre 1995 et 2000. On peut noter que l'EPA n'a pas défini explicitement d'horizon de temps sur lequel l'efficacité des toxines de *Bt* des maïs OGM devrait être conservée. Selon les études scientifiques qui ont été menées, les zones refuges telles qu'elles ont été définies devraient permettre de préserver l'efficacité de ces toxines pour plusieurs dizaines d'années. Cependant, il n'est pas possible de connaître plus précisément cet horizon de temps parce qu'il y a une incertitude sur certains paramètres biologiques (et principalement sur la fréquence initiale des gènes conférant une résistance aux maïs *Bt*). Les caractéristiques des zones refuges sont présentées ci-dessous. Elles sont identiques pour tous les événements de transformation.

Dans les régions exemptes de cultures de cotonnier, telles que la Corn Belt (Centre-Ouest des États-Unis), les agriculteurs doivent semer au minimum 20% des surfaces en maïs avec des semences conventionnelles. Dans les zones de culture de coton (Sud des États-Unis), ces zones refuges doivent atteindre au minimum 50% des surfaces semées en maïs. L'augmentation de la taille des zones refuges se justifie par la présence d'un insecte dont les larves se nourrissent à la fois sur le coton et le maïs⁶. Comme des cotonniers *Bt* sont plantés dans ces régions, la culture de maïs *Bt* peut augmenter les risques de résistance, d'où la nécessité de préserver des zones refuges plus importantes.

Les cultures de maïs conventionnels dans les zones refuges peuvent être traitées par des insecticides (à l'exclusion des formulations à base de toxines de *Bt*). En pratique, les traitements insecticides ne sont pas fréquents car ils sont souvent peu justifiés économiquement. Les refuges peuvent être disposés à l'intérieur ou à l'extérieur des parcelles

transgéniques. Dans le premier cas, ils doivent être semés sur au moins quatre rangs consécutifs. Dans le deuxième cas, le refuge doit être situé à moins de 800 m des parcelles transgéniques.

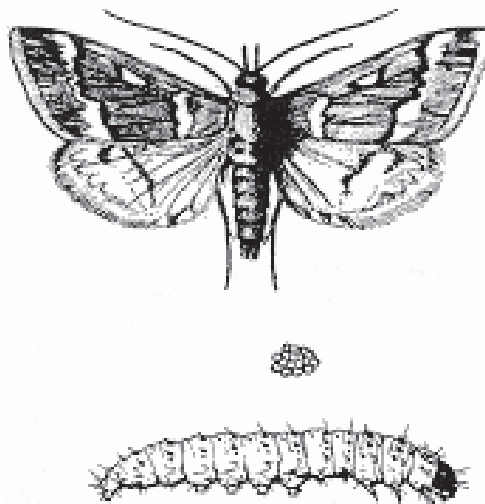
L'agriculteur a intérêt à utiliser des variétés aussi similaires que possible pour le maïs *Bt* et pour le maïs conventionnel de la zone refuge. En effet, ceci lui permet d'appliquer les mêmes pratiques agricoles (sauf la lutte contre la Pyrale) sur les deux types de cultures. De ce point de vue, la gamme de variétés offertes par les semenciers peut avoir un effet sur le coût des zones refuges. En effet, l'agriculteur pourrait supporter une perte s'il était contraint d'utiliser une variété moins adéquate sur la zone refuge. Dans les faits, il semble que ce problème ne se pose pas dans la situation actuelle. En effet, même dans les régions où la diffusion de maïs *Bt* est la plus forte, le marché des semences de maïs conventionnel est plus large que le marché des semences de maïs *Bt*, si bien que la gamme des variétés conventionnelles n'est pas trop restreinte.

La mise en œuvre effective par les agriculteurs

Les zones refuges qui ont été décrites précédemment sont obligatoires depuis 2000. Cependant, il est possible que certains agriculteurs ne remplissent pas cette obligation, notamment pour les trois raisons suivantes. Premièrement, la mise en place des zones refuges engendre des coûts et des contraintes à court terme (possibilité de perte de rendement sur la zone refuge en cas d'attaques de la Pyrale, contraintes liées au semis de deux variétés différentes, temps passé et retard possible dans le calendrier de travail). Deuxièmement, compte tenu de la mobilité des insectes, un agriculteur ne bénéficie pas des avantages liés au contrôle de l'apparition de résistances s'il met en place un refuge mais que ses voisins ne le font pas. Enfin, troisièmement, il est difficile voire impossible de repérer à l'œil nu les zones refuges, ce qui rend le repérage des « tricheurs » assez délicat.

Dans le dispositif actuel de contrôle des

résistances, ce sont les firmes de biotechnologie qui ont la responsabilité d'inciter les agriculteurs à mettre en place les zones refuges et d'évaluer dans quelle mesure cette obligation est respectée. L'EPA ne peut pas



Pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*

⁶ NDLR : Le Ver de l'épi de maïs. Voir la Brève « Le coton Bt file un mauvais cocon ? » en fin d'ouvrage. En ligne à www.inra.fr/opie-insectes/epingle.htm#coc

contrôler elle-même si les agriculteurs respectent les obligations sur les refuges. En revanche, elle peut prendre des mesures à l'encontre des firmes de biotechnologie si elle n'est pas satisfaite de leurs actions dans ce domaine (en théorie, elle peut aller jusqu'à retirer l'homologation d'événements *Bt*). Jusqu'ici, les mesures prises pour encourager le respect des zones refuges par les agriculteurs ont consisté à les informer sur les objectifs du programme de contrôle des résistances, sur le caractère obligatoire des zones refuges et sur les caractéristiques de ces refuges. À partir de 2003, les firmes de biotechnologie et de semences se sont engagées à refuser la vente de semence *Bt* aux agriculteurs ne respectant pas la zone refuge deux années de suite. En 2003, les firmes formeront leurs représentants (qui font des visites de routine dans les exploitations) à identifier les agriculteurs qui ne respectent pas les zones refuges. Les méthodes proposées pour cette identification sont un contrôle des factures ou un questionnaire verbal ou écrit.

La question peut se poser de savoir si ces méthodes sont suffisantes pour assurer une bonne participation des agriculteurs. Un agriculteur qui ne respecterait pas les zones refuges pourrait ne pas être contrôlé, et s'il l'était, la punition serait assez faible. On peut également s'interroger sur le choix fait par l'EPA de déléguer la responsabilité de faire respecter les zones refuges aux firmes de biotechnologie. En effet, ces firmes ont une relation commerciale avec les agriculteurs et il est dans leur intérêt de leur vendre de la semence *Bt*. Elles n'ont donc pas d'intérêt à sanctionner ces agriculteurs. D'autres instruments ont été envisagés pour augmenter la participation des agriculteurs mais n'ont pas été mis en place jusqu'à présent. Il s'agit, par exemple, d'amendes pour les agriculteurs ne mettant pas en place de zones refuges, de ventes liées de lots de semences comprenant des variétés *Bt* et non *Bt*, d'une assurance-récolte sur le refuge, de subventions à la mise en place de refuges.

En parallèle, depuis 2000, les firmes de biotechnologie financent une enquête téléphonique annuelle réalisée par une société indépendante, visant à évaluer le suivi des obligations sur les zones refuges. Les résultats des enquêtes de 2000 et 2001 suggèrent que 70% à 80% des agriculteurs respectent à la fois la taille et la disposition des refuges. Cependant, puisque le dispositif des zones refuges est obligatoire, les agriculteurs peuvent avoir tendance à dire qu'ils ont respecté la réglementation même si ce n'est pas le cas. Cette méthode peut donc surestimer le taux réel de mise en place des refuges.

Le suivi de la résistance

Dans le dispositif actuel de contrôle des résistances, les firmes de biotechnologie sont également chargées du suivi de l'évolution de la résistance. L'objectif de ce suivi est de détecter de manière précoce l'apparition de résistances. De plus, ce suivi permet de

valider des paramètres biologiques utilisés pour définir les caractéristiques des zones refuges. Si une résistance était détectée, un dispositif d'urgence serait appliqué. Ce dispositif n'est pas détaillé ici. Il consiste principalement en quatre actions dans la zone où la résistance serait détectée : une augmentation du suivi de la résistance, la mise en œuvre de moyens alternatifs pour lutter contre la Pyrale du maïs, la mise en place d'un refuge plus important et l'arrêt des ventes de maïs *Bt*.

Afin de surveiller la sensibilité des populations



d'*O. nubilalis* au maïs *Bt*, l'EPA a retenu l'application de doses diagnostiques de toxines de *Bt* sur des populations prélevées dans des champs. Chaque année et pour l'ensemble des États-Unis, des analyses seront faites sur une quinzaine d'échantillons, d'une centaine d'individus chacun, prélevés dans quatre régions dans lesquelles des superficies importantes de maïs *Bt* ont été semées. Avec un tel protocole, les gènes conférant la résistance auront malheureusement peu de chances d'être détectés avant d'atteindre une fréquence supérieure à 10%. Ce point est important car l'efficacité des maïs *Bt* peut être réduite si la fréquence des gènes de résistance dépasse 1 à 5%. De plus, lorsque cette fréquence est atteinte, le risque d'évolution vers une situation où les individus de Pyrale du maïs deviennent pratiquement tous résistants devient élevé. Dans une telle situation les maïs *Bt* perdraient toute efficacité. Pour des raisons de faisabilité et de validité, d'autres méthodes de surveillance, permettant de

détecter une fréquence plus faible des gènes de résistance (inférieure à 1%), n'ont pas été retenues.

À ce jour, aucun problème de résistance n'a pu être mis en évidence dans les populations de la Pyrale du maïs, y compris dans les régions des États-Unis où des maïs *Bt* sont semés depuis 1996 (Bourguet *et al.*, 2003). De plus, aucun gène de résistance aux maïs *Bt* n'a pu être sélectionné dans les différents laboratoires américains et européens travaillant sur le sujet. Enfin, des estimations réalisées conjointement en France et aux États-Unis suggèrent les fréquences des gènes de résistance dans les populations naturelles d'*O. nubilalis* sont suffisamment faibles pour permettre une gestion des problèmes de résistance.

En conclusion

Le dispositif de zones refuges aux États-Unis qui est présenté dans cet article permet de dégager des caractéristiques générales à prendre en compte dans tout programme potentiel de contrôle des résistances chez les ennemis des cultures.

Tout d'abord, la politique élaborée par les pouvoirs publics instaure nécessairement un compromis entre des parties ayant des intérêts différents sur les programmes de contrôle des résistances. Ainsi, plusieurs conflits d'intérêt peuvent être identifiés dans le cas des zones refuges aux États-Unis.

Les firmes de biotechnologie qui commercialisent les maïs *Bt* peuvent avoir intérêt à ce que l'apparition de résistances soit retardée, puisque la durée de commercialisation de leurs événements de transformation est ainsi prolongée. Cependant, cet intérêt n'est pas nécessairement partagé par toutes les firmes, car certaines d'entre elles ont la perspective de mettre sur le marché de nouveaux événements de transformation avec des toxines différentes. De plus, cet intérêt éventuel doit être mis en balance avec les coûts imposés aux firmes par le dispositif de contrôle des résistances (notamment les coûts pour évaluer et augmenter la participation des agriculteurs, et les coûts pour surveiller l'apparition de résistances).

Pour les agriculteurs qui cultivent du maïs *Bt*, les zones refuges présentent un intérêt seulement si une participation collective est assurée, dans la mesure où un agriculteur ne peut pas freiner seul l'apparition de résistances. De plus, si de nouvelles variétés résistantes sont disponibles à moyen terme, la mise en place des zones refuges n'est pas nécessairement dans l'intérêt des

agriculteurs, même au niveau collectif, comme elle leur impose des coûts à court terme.

La commercialisation de maïs *Bt* peut affecter les agriculteurs biologiques qui utilisent des biopesticides contenant des toxines de *Bt*. Telles qu'elles ont été définies, les zones refuges devraient permettre de retarder l'évolution de la résistance de plusieurs dizaines d'années. Si la résistance apparaît, l'efficacité des toxines de *Bt* qui sont présentes dans les maïs OGM sera perdue pour les agriculteurs biologiques.

Ensuite, la définition d'un dispositif de contrôle des résistances nécessite des recherches transdisciplinaires. En effet, il est nécessaire de bien connaître la biologie des ravageurs cibles pour définir des stratégies adaptées de contrôle et de suivi de l'apparition de résistances. De plus, sur le plan économique, il est nécessaire d'analyser le compromis entre les coûts à court terme et les bénéfices à long terme, ainsi que les incitations des différents acteurs à participer à de tels programmes. Ainsi, dans le cas des zones refuges aux États-Unis, nous avons vu que les méthodes utilisées pour inciter la participation des agriculteurs et pour suivre l'évolution de la résistance sont imparfaites. Pour ces deux méthodes, des alternatives plus efficaces existent mais elles sont plus coûteuses. Il est important d'être en mesure d'évaluer ces coûts et de les mettre en balance avec l'objectif du dispositif de contrôle des résistances. Pour le dire autrement, la non-participation de certains agriculteurs et la détection imparfaite de l'apparition de résistances ne sont peut-être pas très gênantes si l'objectif du programme est de retarder de quelques années l'évolution de la résistance. Cependant, elles sont problématiques si l'objectif est de retarder cette évolution sur un horizon de temps plus long.

Si le maïs *Bt* venait à être massivement semé en Europe, la mise en place d'une gestion concertée entre les partenaires européens serait souhaitable. Dans cette optique, on ne peut que souhaiter le renforcement de recherches pluridisciplinaires visant à étudier les effets des différentes alternatives possibles. Ceci permettrait d'évaluer et d'accompagner au mieux les politiques qui pourraient être mises en place pour les OGM, et au-delà, pour d'autres programmes concernant la gestion durable des résistances aux ennemis des cultures ■

Les recherches correspondant à cet article ont reçu un financement du ministère de la Recherche (appel d'offre « impact des OGM »). Ce financement a permis de réaliser une mission d'une semaine aux États-Unis en Novembre 2002 pour rencontrer différents acteurs impliqués dans la définition et la mise en place des zones refuges sur le maïs *Bt*.

Article repris, avec l'aimable autorisation de la revue, d'un texte proposé à *Phytoma – La défense des végétaux*, à paraître dans le n°554 d'avril 2003.

Bibliographie

- AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY STEWARDSHIP TECHNICAL COMMITTEE, 2001. *Bt Corn Insect Resistance Management Survey - 2000 Growing Season*. January 2001 (www.biotech-info.net/bt_corn_survey_2000.pdf).
- ALSTAD D., ANDOW D.A., 1995. Managing the evolution of insect resistance to transgenic plants. *Science*, 268, 1894-1896.
- BOURGUET D., CHAUFaux J., SÉGUIN M., BUISSON C., HINTON J.L., STODOLA T.J., PORTER P., CRONHOLM G., BUSCHMAN L. L., ANDOW D.A., 2003. Frequency of alleles conferring resistance to Bt maize in French and US corn belt populations of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis*. *Theoretical and Applied Genetics*. (Sous presse.)
- CABANETTES J.P., MESTRES R., 1984. Comparaison de l'efficacité de quelques insecticides dans la lutte contre la pyrale. *Phytoma*, 359, 18-19.
- DECOIN M., 1998. Maïs génétiquement modifiés. Tolérance aux insectes, aux herbicides : que pourra-t-on semer au printemps prochain ? *Phytoma-ldv*, 501, 28-30.
- KABIRI F., 1991. Stratégie évolutive contre la pyrale du maïs. *Phytoma*, 428, 23-24.
- CHAUFaux J., MICOUD A., DELOS M., NAÏBO B., BOMBARDE F., EYCHENNES N., PAGLIARI C., MARQUE G., BOURGUET D., 2002. Impact du maïs transgénique Bt sur l'entomofaune non cible. *Phytoma*, 555, 13-16.
- MELLON M., RISSLER J. (dir.), 1998. *Now or never: serious new plans to save a natural pest control*. Washington, DC, Union of Concerned Scientists (www.ucsusa.org).
- RÉJASSE A., BETHENOD M.T., BOURGUET D., 2000. A propos de zones refuges dans le maïs transgénique : que l'on décide ou non de cultiver du maïs « Bt », il est bon de savoir si on peut gérer les risques de résistance et comment ! *Phytoma*, 531, 52-54.
- REYNAUD P., 2002. Maïs, la chrysomèle des racines *Diabrotica virgifera*. Premier signalement en France. *Phytoma*, 555 18-21.
- SCHARF M.E. *et al.*, 2001. Expression and induction of the three family 4 cytochrome P450 (CYP4) genes identified from insecticide-resistant and susceptible western corn rootworms, *Diabrotica virgifera virgifera*. *Insect Molecular Biology*, 10, 139-146.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1998. *The Environmental Protection Agency's White Paper on Bt Plant-pesticide Resistance Management*. May 1998 (www.epa.gov/oppbppd1/biopesticides/white_bt.pdf).
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2001. *Biopesticides registration action document (BRAD)*. October 2001 (www.epa.gov/pesticides/biopesticides/reds/brad_bt_pip2.htm).

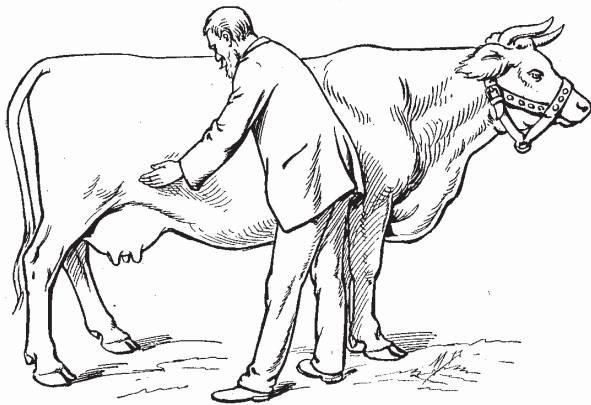


FIG. 2424. — Palper abdominal.

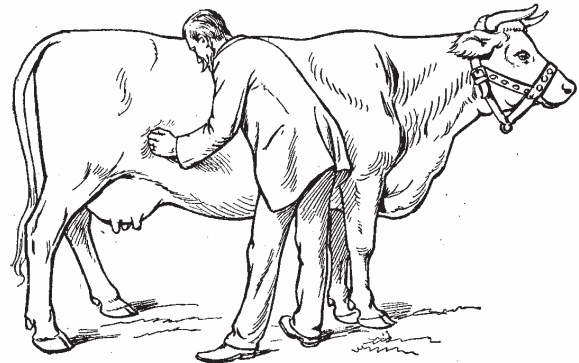


FIG. 2425. — Toucher abdominal.