Facts Series

Impact des plantes génétiquement modifiées sur l'environnement

VIB

Table des matières

Résumé 3
Faits et chiffres 4
1. La technologie par rapport à ses applications 5
2. Impact de l'agriculture sur l'environnement 8
Impact sur la biodiversité 9
Pesticides 9
Engrais 10
Labour 11
Pollution atmosphérique 12
Irrigation 13
3. Effets directs d'une plante (OGM) sur l'environnement 14
Utilisation de produits phytosanitaires 15
L'abeille mellifère et d'autres organismes non cibles 18
Rendement par unité de surface 21
Dispersion des gènes par le pollen (transfert vertical de gènes) 22
Transfert horizontal de gènes 27
Invasivité 28
4. Effets indirects d'une plante (OGM) sur l'environnement par un changement de la pratique culturale 30
Transition vers une agriculture sans labour 31
Plantes tolérantes au glyphosate : le mieux est l'ennemi du bien 32
Résistance aux herbicides 33
Résistance au Bt 35
Protection supplémentaire indirecte des cultures 38
Fléaux secondaires 39
5. L'évaluation européenne des risques environnementaux d'une culture OGM 40
Une étude comparative avec la variante non OGM 41
Invasivité et transfert vertical de gènes dans d'autres plantes 41
Transfert horizontal de gènes entre une plante et des micro-organismes 43
Interaction entre la plante OGM et les organismes cibles 43
Interaction entre la plante OGM et les organismes non cibles 44
Impact des techniques de culture, de gestion et de récolte spécifiques 45
Effets sur les cycles biogéochimiques 45
Effets sur l'homme et sur l'animal 46
Surveillance consécutive à la mise sur le marché ou suivi des cultures commerciales 46
6. Conclusion 47
7. Références 48

Résumé

Ce dossier constitue le second volet d'une série en deux parties consacrée à la sécurité des plantes génétiquement modifiées (OGM). Le premier volet, à savoir le dossier de référence « La sécurité alimentaire des plantes génétiquement modifiées »1, a déjà été publié. Quant au présent dossier, il dresse un état des lieux de l'impact des cultures OGM sur l'environnement.

Toute activité agricole, y compris la culture d'une plante donnée, a une incidence sur l'environnement. Les schémas de culture déterminent les espèces de mauvaises herbes et d'insectes qui envahissent les champs, les machines agricoles compressent le sol, consomment du carburant et rejettent du CO2, tandis que les engrais et pesticides appliqués de manière excessive peuvent subsister dans et sur le sol. Une plante produisant une grande quantité de pollen et de nectar attirera des pollinisateurs tels que les abeilles, alors qu'une autre plante aura tendance à proliférer et à étouffer la végétation locale. L'abandon de la culture de l'avoine au profit de celle de maïs produit par exemple un impact sur l'environnement. En outre, chaque propriété d'une plante (comme sa résistance aux insectes) peut également affecter l'environnement. Il est possible d'obtenir de nouvelles propriétés en appliquant des méthodes de sélection végétale qui font appel soit aux techniques les plus traditionnelles, comme le croisement, soit à la modification génétique, soit encore à de toutes nouvelles méthodes exerçant une action plus ciblée encore dans l'ADN des plantes (pour de plus amples informations, voir le dossier de référence (en néerlandais) « Van plant tot gewas: Het Verleden, heden en de toekomst van plantenveredeling »[2]). Toutefois, l'impact environnemental d'une plante, qu'elle soit génétiquement modifiée ou non, ou d'une propriété de la plante obtenue ou non au moyen de la technologie OGM, dépend en première instance de la plante ou de la propriété proprement dite et pas de la technologie qui a servi à son élaboration. En ce qui concerne les plantes OGM, quatre propriétés importantes sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Certaines propriétés telles que la résistance aux virus, aux insectes et à la sécheresse visent à atténuer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement. D'autres propriétés, comme la résistance aux herbicides, ont été introduites principalement dans le but d'améliorer l'efficacité de la production alimentaire. En d'autres termes, ces propriétés ne sont pas toutes de nature à promouvoir une agriculture respectueuse de l'environnement. Cependant, et contrairement aux nouvelles alarmantes relayées par les médias, les chiffres de l'impact environnemental des plantes OGM donnent un éclairage différent. Globalement, la culture de plantes OGM a apporté un avantage environnemental considérable au cours des dix-huit dernières années.3 Les plantes OGM résistantes aux insectes ont réduit l'utilisation des insecticides à hauteur de 230 millions de kilogrammes. Au service de l'agriculture sans labour, les plantes tolérantes aux herbicides ont permis de diminuer la consommation de carburant et les émissions de CO2 respectivement de 6,3 milliards de litres et de 16,8 millions de tonnes. Toutes plantes OGM confondues, l'avantage environnemental peut être chiffré à 37 %.

Ce dossier entend mettre fin au débat polarisé autour de l'impact des plantes OGM sur l'environnement et offrir une réponse nuancée aux nombreuses préoccupations que suscitent ces plantes. Par définition, la culture de plantes est une situation contre nature qui a une incidence négative sur l'environnement. La technique de la sélection végétale permet de développer des plantes qui atténuent ces effets. L'impact – positif ou négatif – dépend de la propriété de la plante et de la méthode de culture, mais non de la technique d'amélioration mise en œuvre.

Faits et chiffres

L'agriculture est responsable d'environ 10 % des émissions totales de gaz à effet de serre en Europe.

Dans le monde entier, 25 à 30 % de ces émissions peuvent être imputées aux ruminants. Le méthane produit par les vaches augmente à mesure qu'elles broutent.

Si aucune amélioration génétique de nos cultures agricoles n'avait été opérée au moyen de la sélection végétale depuis 1965, la superficie totale utilisée pour l'agriculture (la surface agraire) serait supérieure de 3 à 5 %.

Depuis leur introduction, les cultures de plantes OGM tolérantes aux herbicides ont entraîné une diminution de 16,8 millions de tonnes d'émissions de CO2 et de 6,3 milliards de litres de carburant, soit l'équivalent de près de 7,5 millions de voitures qui ne circuleraient pas pendant un an.

Une méta-étude récente démontre que la culture des plantes OGM actuelles a permis de réduire de 37 % l'utilisation de produits phytosanitaires dans les champs concernés.

En 2013, 21,3 millions de kilogrammes d'insecticides (substance active) ont été économisés grâce à la culture de coton OGM résistant aux insectes.

Si l'on compare les champs de plantes OGM résistantes aux insectes aux champs traditionnels aspergés d'insecticides, les insectes utiles sont présents en plus grand nombre dans les premiers champs.

Tant les défenseurs que les adversaires de la technologie OGM s'accordent sur le fait que la résistance aux insectes est susceptible d'améliorer considérablement notre système de production agricole sur le plan écologique.

Afin de prévenir la résistance parmi les mauvaises herbes, les insectes et les champignons, il faut protéger les plantes de manière intégrée et donc faire appel simultanément à différents moyens ou techniques pour lutter contre un fléau bien ciblé.

Avant qu'une plante OGM puisse être cultivée à l'échelle commerciale au sein de l'Union européenne, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) la soumet à une analyse de risques par rapport à sa culture.

I La technologie par rapport à ses applications

De nombreux aspects de l'agriculture, sinon tous, ont un impact négatif sur la biodiversité, sur la structure et la santé du sol ainsi que sur la qualité de l'air et de l'eau. Le débat sur les plantes génétiquement modifiées (OGM) pose la question de savoir si la culture de plantes OGM implique un plus grand risque pour l'environnement par rapport aux plantes non OGM. Dans ce dossier, nous répondons à cette question en insistant sur le fait que ce sont les propriétés intrinsèques de la plante qui déterminent l'impact environnemental d'une culture et non pas la technologie à partir de laquelle la plante a été élaborée.

L'introduction de plantes OGM ne soulève pas seulement des inquiétudes par rapport à la sécurité alimentaire, mais également des questions quant à leur impact potentiel sur l'environnement. Quel est le degré de spécificité de l'action des plantes OGM résistantes aux insectes ? Peuvent-elles également nuire aux insectes ou organismes utiles ? Les gènes tolérants aux herbicides peuvent-ils se retrouver dans les mauvaises herbes et ainsi en rendre le contrôle moins efficace ? Dans quelle mesure les plantes OGM peuvent-elles avoir un effet bénéfique sur la nature ? Peuvent-elles réduire l'utilisation de produits phytosanitaires ?

Il existe différentes manières de développer des nouvelles variétés végétales. Ainsi, des pommes de terre résistantes au mildiou peuvent être obtenues au moyen de techniques d'amélioration classiques ou en faisant appel à la technologie OGM (pour de amples informations, voir le dossier de référence (en néerlandais) « Een schimmelresistente aardappel voor België »[4]). L'impact potentiel des plantes OGM et non OGM, par exemple leur prolifération et leurs effets sur des organismes non ciblés et sur la biodiversité, est très similaire. Pourtant, il va de soi qu'il faut vérifier l'incidence des plantes OGM sur l'environnement lorsqu'elles sont cultivées à grande échelle dans les champs. La technologie OGM permet en effet d'obtenir des propriétés auparavant inexistantes parmi les plantes. Ces nouvelles propriétés peuvent avoir un effet direct sur l'environnement ou un effet indirect sur le milieu ambiant parce que la nouvelle plante est cultivée différemment.

Tout comme une plante OGM doit suivre une procédure stricte sur le plan de la sécurité alimentaire avant d'être autorisée pour la consommation humaine ou animale (voir le dossier « La sécurité alimentaire des plantes génétiquement modifiées »[1]), la culture d'une plante OGM n'est autorisée qu'après avoir été soumise à une étude environnementale de grande envergure. Celle-ci a pour but de vérifier notamment si la plante OGM a un effet différent sur le sol, la vie des sols, les insectes, les plantes voisines, etc., comparée à la plante sans OGM. Les effets environnementaux potentiels des plantes OGM font l'objet d'études scientifiques depuis 30 ans. À l'instar des essais de sécurité alimentaire, les analyses de sécurité environnementale s'effectuent également sur la base des propriétés intrinsèques de la plante. En effet, il est impossible d'énoncer des vérités générales pour l'ensemble des plantes OGM. Chacune d'elles doit faire l'objet d'une étude individuelle en fonction de la propriété introduite. Les plantes OGM présentes aujourd'hui dans les champs sont principalement tolérantes aux herbicides ou résistantes aux insectes (voir encadré « Applications OGM actuelles »).

Tout comme dans le dossier de référence portant sur la sécurité alimentaire des plantes OGM, nous examinons, dans les pages qui suivent, les effets que les plantes OGM actuelles peuvent avoir sur l'environnement. Dans ce cadre également, nous voulons offrir une réponse nuancée aux nombreuses préoccupations existantes en nous basant sur la littérature scientifique récente. Afin de contextualiser la sécurité alimentaire des plantes OGM, nous commencerons par aborder l'impact que l'agriculture exerce en général sur l'environnement. La question du mode d'évaluation des plantes OGM revêt une importance cruciale dans ce débat. L'incidence environnementale d'une culture OGM doit-elle être comparée à celle de la culture conventionnelle, de la culture biologique ou d'une politique agricole intégrée ?

APPLICATIONS OGM ACTUELLES

Les principales applications OGM disponibles aujourd'hui sur le marché sont la tolérance aux herbicides, la résistance aux insectes, la résistance aux virus et la tolérance à la sécheresse. De nombreuses autres applications susceptibles de contribuer à une agriculture durable (p. ex. une pomme de terre OGM résistante aux champignons) ou pouvant être mises en œuvre à des fins humanitaires (p. ex. riz doré) sont en cours de développement ou attendent une autorisation de culture.

Les plantes tolérantes aux herbicides résistent à la pulvérisation d'herbicides qui éliminent par contre toutes les mauvaises herbes du champ. La tolérance aux herbicides suscite la critique parce qu'elle encourage l'utilisation d'herbicides dans l'agriculture. Toutefois, la tolérance aux herbicides n'a rien d'extraordinaire, puisque chaque plante est naturellement tolérante à un ou plusieurs herbicides. Les mauvaises herbes peuvent ainsi être éliminées dans un champ de pommes de terre grâce à des herbicides spécifiques (p. ex. les substances actives propaquizafop et rimsulfuron) parce que la pomme de terre est tolérante à ces produits.[5,6] Outre ces tolérances spontanées, la tolérance aux herbicides peut être obtenue au moyen de la sélection végétale. Depuis 1970, des techniques d'amélioration classiques sont mises en œuvre pour élaborer des plantes tolérantes à des herbicides couvrant un large spectre de mauvaises herbes. Cette propriété offre un grand avantage à l'agriculteur en permettant une gestion simple et flexible des mauvaises herbes. Dans les régions sensibles à l'érosion, la tolérance aux herbicides offre du reste un avantage indirect pour l'environnement, car elle autorise une agriculture sans labour. La structure du sol s'en voit améliorée, l'érosion du sol diminue et la consommation de carburant est réduite, ce qui fait donc baisser les émissions de CO_2. Les techniques d'amélioration modernes (telles que la technologie OGM) permettent également de développer une tolérance aux herbicides. La tolérance aux herbicides est donc indépendante de toute méthode d'amélioration et offre surtout une réponse aux besoins des agriculteurs. Les exemples d'OGM les plus connus et les plus rentables sur le plan commercial sont les tolérances au glyphosate et au glufosinate (commercialisés respectivement sous le nom de RoundUpReady et LibertyLink).[7] La tolérance aux herbicides que présentent ces plantes OGM s'explique par la production de protéines bactériennes.

Les plantes résistantes aux insectes peuvent se défendre elles-mêmes contre certains insectes nuisibles. Elles exigent donc nettement moins d'insecticides, ce qui a un effet positif sur les insectes utiles et l'environnement en général. Certaines plantes OGM ont reçu la propriété de résistance aux insectes par l'intégration dans leur ADN d'informations génétiques de bactéries, plus précisément du Bacillus thuringiensis (« Bt » en abrégé). Les plantes Bt résistantes aux insectes produisent des protéines de ce bacille et sont ainsi en mesure d'éloigner des insectes spécifiques.

Depuis les années 1990, il existe des OGM qui résistent à certains phytovirus. La papaye OGM résistante aux virus, en particulier, est un véritable succès. La papaye génétiquement modifiée a été développée par deux universités américaines sans l'intervention de l'industrie et a sauvé l'industrie hawaïenne de la papaye de la ruine en 1998.[8] Outre la papaye, des tomates, potirons et poivrons génétiquement modifiés sont également cultivés à petite échelle.[7] Ils produisent une ou plusieurs protéines issues de phytovirus ou de molécules RNAi spécifiques et sont donc immunisés contre les virus en question (pour de plus amples informations, voir dossier de référence (en néerlandais) « Virus-resistente papaja in Hawaï »)[8].

Depuis 2013, le maïs génétiquement modifié cultivé aux États-Unis résiste mieux aux périodes de sécheresse. La tolérance à la sécheresse ne signifie pas que les plantes peuvent croître dans des régions arides mais qu'elles sont capables de surmonter les périodes de sécheresse sans subir de lourdes pertes de rendement. Le maïs génétiquement modifié tolérant à la sécheresse disponible à l'heure actuelle utilise une protéine de la bactérie de sol Bacillus subtilis *et produit, en situation de stress de sécheresse, un rendement en moyenne 7 % supérieur à celui du maïs traditionnel.[9]*

2 Impact de l'agriculture sur l'environnement

La production d'aliments destinés à la consommation humaine et animale est l'une des activités humaines ayant un impact extrêmement important sur l'environnement. En effet, l'agriculture consiste à protéger des cultures et à maintenir sous contrôle des organismes indésirables tels que les mauvaises herbes et les insectes. L'abondance d'une récolte dépend également de la bonne structure et de la fertilité du sol. C'est pourquoi le sol est fertilisé, tandis que la charrue est utilisée pour éliminer les résidus de plantes et ameublir la terre. Toutes ces interventions ont un impact sur l'environnement.

Impact sur la biodiversité

La biodiversité désigne la variété du nombre et des espèces d'êtres vivants présents dans un certain milieu. L'homme a commencé à cultiver des plantes pour produire davantage de nourriture et être moins dépendant de la cueillette et de la chasse.

L'agriculture entraîne systématiquement le défrichage de zones naturelles et le déboisement et exerce une influence considérable sur la biodiversité naturelle. La production de nourriture affecte davantage encore l'équilibre naturel. En effet, les plantes constituent la base de toute pyramide alimentaire, pas uniquement celle de l'homme. Les plantes sont assaillies par des bactéries, des virus, des champignons, des insectes et des phytophages vertébrés. En outre, les terres fertiles sur lesquelles les plantes sont cultivées sont le lieu de prédilection des mauvaises herbes ou de plantes indésirables qui font concurrence aux plantations. En d'autres termes, produire suffisamment de nourriture pour l'homme et l'animal implique de maintenir la population de ces autres êtres vivants sous contrôle. Leur éloignement du champ et, dans de nombreux cas, leur élimination affectent la biodiversité, de manière tant directe qu'indirecte. La présence décroissante d'insectes et de mauvaises herbes à graines, lorsque les champs sont traités aux insecticides ou herbicides, est un exemple d'effet direct. La biodiversité des oiseaux peut également être mise indirectement en danger, étant donné que les insectes et les mauvaises herbes font partie du régime alimentaire de certains d'entre eux.

L'impact des produits phytosanitaires est évident. Mais d'autres pratiques agricoles ont également une grave incidence sur la biodiversité. Grâce à la technique du labour, la charrue permet de retourner le sol plusieurs fois par an, alors même que la charrue et les lourds tracteurs compressent les couches de terre plus profondes. Ces travaux ont des conséquences pour la vie dans le sol.[10] Par ailleurs, l'épandage de fumier de ferme ou d'engrais chimique augmente la présence d'azote et de phosphate dans le champ, ce qui affecte la vie dans le sol et la nappe phréatique. Dans les régions agricoles arides, l'irrigation permet de diminuer les chances de survie des mauvaises herbes affectionnant la sécheresse. L'agriculture en soi, qu'elle soit conventionnelle ou biologique, a donc un impact considérable sur la biodiversité. Mais cet impact n'est pas nécessairement négatif. Ces cultures donnent également naissance à de nouveaux écosystèmes qui enrichissent la biodiversité.

Pesticides

L'utilisation des premiers pesticides remonte à environ 2 000 ans avant notre ère. Les Sumériens et les Chinois utilisaient à la fois des produits végétaux et des substances

soufrées pour protéger les récoltes.[11] Le 20e siècle a révolutionné les usages en la matière. Les recherches intensives conduites dans le secteur de la chimie ont en effet débouché sur la mise au point d'un grand nombre de produits permettant de tuer des mauvaises herbes, des champignons et des insectes, entraînant une augmentation spectaculaire des rendements.

La destruction d'organismes dans un champ en vue de protéger les récoltes a un impact sur l'environnement qui est toléré dans de nombreux cas. En effet, l'objectif est de produire de la nourriture pour l'homme et pour l'animal et non pour les insectes et les champignons. Lorsqu'une telle stratégie est mise en œuvre, il importe cependant que l'action des produits phytosanitaires utilisés soit la plus ciblée possible. Dans ce contexte, il est question d'organismes cibles et non cibles. Les organismes cibles sont par exemple certains insectes qui entravent les plantes dans leur croissance ou qui s'attaquent aux récoltes. Les insectes qui n'endommagent pas la plante et les insectes utiles qui la protègent au titre de prédateurs de ravageurs figurent parmi les organismes non cibles. En d'autres termes, l'utilisation de produits phytosanitaires doit laisser ces insectes indemnes. Les pesticides doivent éliminer un maximum d'organismes cibles et avoir le moins d'effet possible (idéalement aucun) sur les organismes non cibles. Mais quelle que soit la méthode phytosanitaire mise en œuvre (chimique ou biologique), il est difficile de combattre un fléau sans déplorer d'effets secondaires indésirables. Par exemple, la pyréthrine, un biopesticide autorisé dans l'agriculture biologique pour combattre les invasions d'insectes, est également nocif pour les abeilles et d'autres insectes utiles.[2,12]

Engrais

Les plantes possèdent le don unique de fabriquer de l'oxygène et des glucides à partir d'énergie solaire, d'eau et de CO_2. Ce processus porte le nom de photosynthèse. Cependant, elles ont besoin de plus que des glucides pour bien pousser. Durant leur croissance, les plantes extraient du sol toutes sortes d'éléments comme de l'azote, du phosphore et du potassium. Afin de maintenir un niveau élevé de productivité, les terres agricoles sont enrichies de ces éléments au moyen d'engrais. Or, le fumier de ferme et les engrais organiques ont une composition fluctuante et ne sont pas parfaitement adaptés aux besoins de certaines cultures. La croissance des plantes est limitée par l'élément qui est présent dans la plus faible concentration. La plante n'utilise donc pas tout le contenu de l'engrais et les eaux de surface et souterraines se retrouvent ainsi polluées par un excès de nutriments. En outre, le fumier de ferme acidifie le sol. Du point de vue agricole, les engrais chimiques se révèlent donc parfois un meilleur choix parce que leur composition peut être optimisée en fonction de la culture. Toutefois, la production d'engrais chimiques consomme beaucoup d'énergie, est polluante et coûteuse.

L'amendement des terres agricoles est l'une des principales causes de pollution des eaux de surface. Par exemple, l'infiltration d'engrais phosphatés dans des bassins et rivières peut entraîner l'eutrophisation des cours d'eau et des eaux côtières,[13,14] c'est-à-dire une prolifération massive d'algues aboutissant à une disparition de l'oxygène et donc de toute vie dans les écosystèmes aquatiques.

Labour

Nous sommes tellement familiarisés avec certaines pratiques agricoles comme le labourage, l'application d'engrais et la préparation d'un champ à l'ensemencement que nous supposons qu'elles sont peu nocives pour l'environnement. Pourtant, ces activités entraînent l'érosion du sol et la perte de productivité agricole. Le labour peut avoir différents effets secondaires en fonction du type de sol et du climat.

Si l'ameublissement du sol est nécessaire afin d'alléger un sol lourd et compact, le labour peut cependant nuire aux sols légers et sensibles à l'érosion. Lorsqu'on laboure ou retourne le sol, la terre est morcelée et émiettée et les particules de terre fertile peuvent alors être emportées plus facilement par le vent ou quitter le champ par ruissellement après une forte averse. Les retournements du sol font remonter les terres humides à la surface et les dessèchent. Si ceci est utile dans les régions connaissant des hivers humides puisque l'ensemencement peut alors débuter plus tôt, il faut cependant éviter cette pratique dans les régions sèches car l'évaporation supplémentaire causée par le labour réduit les réserves d'humidité contenues dans le sol. Le moment d'exécution du labour et l'état du champ peuvent également avoir un impact très lourd. En effet, faire circuler de lourds tracteurs sur un sol humide peut compresser totalement les terres. Les traces de pneus parsemées de flaques visibles à partir de l'automne dans les champs de Flandre sont caractéristiques de sols compressés. Les racines des plantes ont donc toutes les difficultés à se développer, ce qui entraîne une perte de rendement.

En Europe, la détérioration du sol due à l'érosion (surtout dans les régions méridionales) et au tassement du sol (dans les zones plus humides) est l'un des grands problèmes auxquels les activités agricoles traditionnelles sont confrontées.[15,16] C'est ce qui explique l'intérêt croissant que suscite l'agriculture sans labour ces dernières décennies. Lorsqu'on ne retourne pas la terre ou qu'on la malaxe de manière moins intensive, une plus grande quantité de résidus de cultures subsiste dans le champ. Les particules du sol sont ainsi davantage agglomérées, ce qui le protège mieux de l'érosion. En outre,

un labourage minimal optimise la structure du sol et en augmente la portance. Dans des conditions humides, un sol non labouré sera donc bien plus praticable qu'un champ ayant subi les effets de la charrue.[16-18] Par ailleurs, la vie dans le sol est beaucoup moins perturbée, ce qui a un effet positif sur l'activité biologique qui s'opère sous nos pieds.[19-23] La présence de résidus de cultures attire également davantage les oiseaux et les petits animaux. La dégradation spontanée des résidus crée de nouveaux écosystèmes qui enrichissent la biodiversité dans le champ.[24]

Si l'absence de labour présente tant d'avantages, pourquoi le pratique-t-on encore ? Chaque médaille a son revers. Lorsque le sol n'est pas labouré, il est davantage envahi par les mauvaises herbes. Et les mauvaises herbes sont le cauchemar de tout agriculteur. L'élimination des mauvaises herbes avant l'ensemencement passe par exemple par leur enfouissement. Mais lorsqu'on renonce à la charrue pour préserver la structure du sol, les mauvaises herbes doivent être combattues autrement, ce qui, dans le cas de l'utilisation d'herbicides, peut avoir un impact négatif sur l'environnement et la biodiversité.

Pollution atmosphérique

Au cours des deux derniers siècles, l'activité humaine a occasionné une augmentation extrêmement importante des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4). L'agriculture y contribue dans une grande mesure. En Europe, les activités agricoles sont responsables d'environ 10 % des émissions totales de gaz à effet de serre.[25] Les véhicules agricoles ne sont pas les seuls à polluer l'air. Les rizières sont par exemple à l'origine de 10 % des émissions mondiales de méthane dues à l'homme.[26] Le méthane figure au nombre des gaz à effet de serre qui sont à l'origine du réchauffement de la planète. Le cheptel a également une grande incidence. Aux États-Unis et en Europe, les ruminants causent 25 à 30 % des émissions de méthane.[6,27] Le méthane est produit dans le rumen des bovins en tant que sous-produit de la digestion microbienne. Il est rejeté par le biais de la respiration. La production de méthane est déterminée en premier lieu par le type d'aliment ingéré. La quantité de méthane produite par les vaches augmente à mesure qu'elles broutent.

Irrigation

Durant leur croissance, les plantes sont confrontées à toutes sortes d'agents pathogènes qui influencent négativement la récolte. Une diminution de performance des plantes due à des facteurs externes résulte souvent d'un « stress ». Lorsque des organismes vivants comme des insectes et des bactéries en sont la cause, l'on parle de stress biotique. Mais le stress abiotique existe également. Il désigne un ralentissement de la croissance imputable à des conditions ambiantes sous-optimales, comme le manque d'azote dans le sol. Les déficits de certains nutriments dans le sol peuvent être corrigés au moyen d'un amendement adapté. Par ailleurs, l'irrigation permet d'éviter les baisses de rendement consécutives à la sécheresse, un autre facteur de stress biotique. 40 % de la production alimentaire proviennent de l'agriculture par irrigation.[7] L'eau utilisée à cette fin est souvent issue des réserves d'eau douce souterraines. Quelque 70 % de l'eau extraite des réserves naturelles sont utilisés pour l'agriculture.[28] L'épuisement de nos réserves d'eau douce est une perspective peu réjouissante.

3 Effets directs d'une plante (OGM) sur l'environnement

Outre les pratiques agricoles en général, la culture d'une plante en particulier peut avoir des incidences supplémentaires sur l'environnement en raison de ses caractéristiques intrinsèques. Les effets directs de ces caractéristiques sont examinés dans ce chapitre. Ils peuvent être positifs ou au contraire provoquer une agression supplémentaire de l'environnement. Ils ne dépendent pas de la méthode d'amélioration utilisée pour le développement de la plante.

Utilisation de produits phytosanitaires

2,4 millions de tonnes de pesticides (tels qu'insecticides, fongicides et herbicides) sont utilisés chaque année.[29,30] Pourtant, la maladie est plutôt exceptionnelle dans le règne végétal. Au fil de l'évolution, les plantes se sont en effet constitué une immunité contre un grand nombre d'agresseurs tels que champignons, virus, bactéries et insectes. Cependant, toutes les plantes résistantes aux maladies ne sont pas propres à la consommation ou appréciées comme variété commerciale. Le consommateur et l'industrie de la transformation ont établi des exigences auxquelles un produit alimentaire doit répondre, comme le goût, la taille et la durée de conservation. La variété de pomme de terre Bintje en est un bel exemple. La Bintje est très sensible aux maladies de la pomme de terre, ce qui en empêche la culture à grande échelle sans l'utilisation de grandes quantités de fongicides. Néanmoins, la Bintje continue d'occuper quelque 50 % de la surface dédiée à la production de pommes de terre en Belgique, alors qu'il existe des variétés de pommes de terre dont la culture exige moins de pesticides.

Qu'il s'agisse de la pomme de terre ou d'autres plantes, les sélectionneurs de plantes consacrent beaucoup de temps et de moyens afin de transférer des résistances aux maladies présentes à l'état naturel dans des variétés intéressantes sur le plan commercial. L'objectif est d'améliorer la sûreté des récoltes et de réduire l'utilisation de pesticides. Dans le secteur de la sélection végétale biologique, l'on tente également d'améliorer des variétés pour qu'elles développent un vaste feuillage très rapidement après la germination. Les germes de mauvaises herbes bénéficient ainsi de moins de lumière et la quantité d'herbicides peut être réduite.

Outre les champignons et les mauvaises herbes, les insectes représentent un problème important dans l'agriculture. Au fil de l'évolution, les plantes ont mis au point différentes stratégies pour se préserver des insectes et autres phytophages. Cela va de changements morphologiques comme le développement d'épines à la production de certaines substances défensives. Ces substances défensives sont souvent des protéines et des métabolites secondaires comme des lectines, des inhibiteurs de protéases à cystéine, des glucosinates, des alcaloïdes, etc.[31] Les métabolites secondaires sont des substances chimiques qui jouent un rôle important dans la protection et la survie des plantes. Les substances défensives participent à la guerre biologique menée entre la plante et l'assaillant. La plante sécrète certaines substances en continu et d'autres uniquement lorsqu'elle subit une attaque.

Présentes en abondance dans le règne végétal, les lectines sont des protéines qui se lient aux glucides.[32] En général, une plante ne produit des lectines que lorsqu'elle est effectivement agressée. Certaines variétés de froment, par exemple, ne synthétisent des lectines dans leurs feuilles qu'en cas d'attaques d'insectes.[32] Il existe des centaines de lectines différentes qui protègent les plantes contre les ravageurs et certaines d'entre elles, comme la phytohémagglutinine présente dans les haricots rouges

« rognons de coq », sont même toxiques pour l'homme. C'est pour cette raison que cette variété de haricots doit cuire longuement afin que la lectine soit dégradée et qu'ils deviennent propres à la consommation. Dans certains cas, il est possible de rendre des variétés végétales commerciales résistantes aux insectes au moyen de croisements, à condition qu'une plante croisable produisant des lectines ou une autre substance défensive soit disponible.[31,33] La culture d'une telle plante résistante aux insectes exige une moindre utilisation d'insecticides, ce qui est positif pour l'environnement, mais une substance de protection comme la lectine peut également nuire directement ou indirectement à des insectes utiles ou à d'autres organismes non nuisibles. L'impact de la plante résistante aux insectes sur des organismes utiles est déterminé par la spécificité du mécanisme de résistance (p. ex. les lectines) et non par la technique (croisement, technologie OGM…) par laquelle le mécanisme de résistance est introduit dans la plante.

Mis à part le recours aux techniques d'amélioration traditionnelles telles que le croisement, la résistance aux insectes peut également être obtenue à travers la technologie OGM. Les plantes Bt constituent sans aucun doute l'exemple le plus connu d'application de cette technique. Ces plantes ont reçu des informations génétiques de la bactérie Bacillus thuringiensis qui leur permettent de synthétiser une ou plusieurs protéines nocives pour certains insectes.[34]

Les plantes résistantes aux insectes se préservent elles-mêmes d'un ou plusieurs groupe(s) d'insectes. Dans le cas des plantes Bt génétiquement modifiées, la résistance est dirigée contre les chenilles et les larves de papillons de nuit ou les charançons. De ce fait, les plantes Bt ne doivent plus être traitées au moyen des substances chimiques ou biologiques normalement utilisées pour les combattre. L'action insecticide du Bt est connue depuis plus d'un siècle et les produits commerciaux à base de Bt sont disponibles depuis les années 1940.[34] Les aérosols Bt occupent plus de 90 % du marché des biopesticides et sont un moyen efficace de maintien sous contrôle de la population d'insectes, surtout dans l'agriculture biologique.[35,36] Aujourd'hui, quatre plantes ayant reçu des informations génétiques par le biais de la technologie OGM pour synthétiser des protéines Bt sont cultivées à des fins commerciales : le coton, le maïs, le soja et l'aubergine. C'est surtout dans la culture du coton que l'on observe une forte diminution de l'utilisation des insecticides.[34] Le coton est une plante qui requiert de très grandes quantités d'insecticides, notamment contre le charançon du cotonnier. Le coton est cultivé sur 2,5 % de la surface agraire mondiale mais est responsable à lui seul de 16 % de l'utilisation d'insecticides dans le monde.[37] En 2013, la culture de coton Bt a permis d'économiser 21,3 millions de kilogrammes d'insecticides (substance active).[3] Cela revient pratiquement à une réduction de moitié de la consommation totale d'insecticides dans la culture du coton, soit, pour être précis, une diminution de 48,3 %. Si l'on tient compte du fait que la culture de coton OGM résistant aux insectes a été introduite en 1996, cela représente une économie de 230 millions de kg d'insecticide.[3] En outre, la culture à grande échelle de plantes OGM résistantes aux maladies entraîne une diminution globale des maladies, ce qui réduit à son tour l'utilisation de pesticides dans les cultures non OGM voisines.[38]

Pour les cultures du soja et du maïs, les économies d'insecticides sont un peu moins spectaculaires parce que les insectes contre lesquels les plantes Bt ont été mises au point sont moins dominants, comparés au charançon du cotonnier. Il s'agit néanmoins d'avantages substantiels pour l'environnement. En 2013, 8,2 millions de kg d'insecticides ont été économisés grâce à la culture du maïs Bt, soit une baisse de 84 % de l'emploi d'insecticides combattant spécifiquement les hepialidæ.[3] Durant la période comprise entre 1996 et 2013, la culture du maïs Bt a réduit l'utilisation d'insecticides de 72 millions de kilos. L'impact environnemental de la culture du maïs OGM durant cette période a donc été inférieur de 53 % à celui des cultures conventionnelles. S'agissant de la culture du soja Bt, encore limitée car elle n'a commencé qu'en 2013 en Amérique du Sud, une économie de 0,4 million de kilos d'insecticides a été atteinte, soit 1 % de l'emploi total d'insecticides dans la culture du soja.[3]

L'effet positif de la culture de plantes Bt est confirmé de manière indépendante par l'économiste agricole Charles Benbrook,[39] une voix critique dans le débat sur les OGM qui, en dépit de toutes les données scientifiques, affirme qu'il n'existe pas de consensus scientifique sur la sécurité de la technologie OGM.[40] Tant les défenseurs que les adversaires de la technologie OGM s'accordent donc sur le fait que la résistance aux insectes est susceptible d'améliorer considérablement notre système de production agricole sur le plan écologique et que les plantes Bt l'ont indéniablement démontré au cours des dernières décennies.

L'abeille mellifère et d'autres organismes non cibles

Lorsqu'on cultive des plantes qui se protègent elles-mêmes des insectes nuisibles, il est extrêmement important de vérifier l'effet qu'elles produisent sur les insectes utiles ou sur les organismes qui ne causent aucun dommage à la plante (les organismes non cibles). En effet, il est hors de question que la culture d'une nouvelle plante ou variété ou qu'une nouvelle propriété de la plante nuise à l'écosystème. La tâche est cependant loin d'être évidente, surtout lorsqu'un organisme non cible présente de grandes similitudes physiologiques avec un organisme nuisible qui doit être maintenu sous contrôle. La possibilité d'éliminer cet organisme nuisible sans causer d'effets indésirables sur les organismes non cibles est l'un des grands défis à relever par tous les produits phytosanitaires, qu'ils soient chimiques ou biologiques. Même un système de défense qui a évolué de manière naturelle n'est pas toujours sélectif. Les plantes produisent certaines substances de protection pour s'armer contre des pathogènes ou des phytophages. Les lectines abordées plus haut (voir page 15), dont l'action n'est pas nécessairement très spécifique, en sont un parfait exemple.

Dans le débat sur l'effet de l'agriculture sur les organismes non cibles, l'abeille mellifère est au cœur des attentions. Cet insecte utile non seulement produit du miel mais est également responsable de la pollinisation d'un quart des plantes.[41] La multiplication des plantes dépend de la bonne pollinisation par les insectes pour une récolte à la fois qualitative et quantitative. Partout dans le monde, les apiculteurs voient leurs populations d'abeilles régresser et, parfois sans raison, ils en font porter partiellement la responsabilité aux plantes OGM. En réalité, l'on observe un affaiblissement général et un taux de mortalité anormalement élevé des abeilles mellifères dans le nord de l'Europe (p. ex. en Belgique).[42] Pourtant, aucune plante OGM n'est cultivée à des fins commerciales en Belgique et dans les pays limitrophes. Par définition, les plantes OGM ne peuvent donc être à l'origine de la régression des populations d'abeilles.

Les plantes Bt résistantes aux insectes sont principalement visées. En effet, l'abeille est un insecte qui, dans le cadre de son travail de pollinisation, entre en contact avec de grandes quantités de pollen contenant des protéines Bt. Ce lien de cause à effet n'est cependant étayé par aucune donnée scientifique, avant tout parce que les protéines Bt possèdent un mécanisme d'action très spécifique (pour de plus amples informations, voir le dossier de référence (en néerlandais) « Bt-katoen in India »[34]). Une fois ingérée, la protéine Bt est reconnue par des récepteurs spécifiques situés sur la paroi intestinale de l'insecte sensible. Il s'agit de sortes d'antennes qui déclenchent une réaction lorsqu'elles reçoivent un signal.[34] Selon son type, la protéine Bt agit seulement contre des familles d'insectes bien déterminées, à savoir celles qui possèdent les bonnes « antennes intestinales ». Les protéines Bt utilisées aujourd'hui dans l'agriculture n'étant pas reconnues par les abeilles, ces dernières ne peuvent, par définition, être sensibles aux plantes Bt actuellement autorisées. Un grand nombre d'études menées en laboratoire et sur le terrain l'ont confirmé.[43-47] Ces études ont révélé qu'en comparaison avec le pollen de plantes non Bt, le pollen des plantes Bt n'a aucun effet sur le poids et le sens d'orientation des abeilles, la quantité de pollen collectée, l'activité des collectrices de pollen, l'état de santé de la colonie, le poids et le développement du couvain.[43-47] Il a également été établi que les protéines Bt ingérées n'affectent en rien les cellules intestinales des abeilles.[48]

L'effet des protéines Bt n'a pas seulement été étudié sur les abeilles. Des recherches ont également été menées sur d'autres insectes. En Espagne par exemple, l'on a vérifié l'effet du maïs Bt sur différents insectes dans les champs. Une méta-analyse basée sur 13 essais menés en conditions naturelles en Espagne a montré que le maïs BT n'a aucun effet néfaste sur les 26 groupes d'insectes examinés.[49] Toutefois, d'autres études font apparaître que les plantes Bt peuvent parfois nuire au développement de certains prédateurs (des insectes qui utilisent d'autres insectes pour se nourrir) et parasitoïdes (des insectes qui pondent leurs œufs dans le corps d'autres insectes) d'insectes sensibles au Bt.[50] Ces effets étant souvent imputables à un impact écologique indirect dû à une moindre présence d'insectes sensibles au Bt, ils sont analysés au chapitre suivant (voir page 38). L'effet négatif sporadique et limité des plantes Bt sur des organismes non cibles et sur l'environnement est infinitésimal par rapport à l'impact des insecticides traditionnels.[50]

LE MONARQUE

L'une des études les plus célèbres analysant l'effet des plantes OGM sur les organismes non cibles est celle conduite aux États-Unis sur le papillon monarque. En 1999, deux entomologistes de l'université Cornell de New York avancent dans la très sérieuse revue Nature que le pollen du maïs Bt résistant aux insectes est nocif pour le monarque.[51] Cet article fait l'effet d'une bombe. La nouvelle fait la une des journaux et se répand à travers le monde. Tout comme l'abeille mellifère, le monarque est un insecte qui attire la sympathie. En Amérique du Nord, ce papillon est d'ailleurs un véritable symbole et est parfois surnommé « le Bambi du monde des insectes ».[52] Ce splendide papillon aux ailes orange veinées de noir dégage quelque chose de mystérieux. Chaque année, il entreprend un périple héroïque partant du Canada et des États-Unis pour se rendre dans les forêts mexicaines où il passe l'hiver. Cette migration annuelle simultanée de millions de papillons sur de très longues distances est l'un des phénomènes naturels les plus connus.

Au cours de leurs longs voyages, les monarques déposent leurs œufs sur l'asclépiade (Asclepias syriaca), une

plante issue de la famille des pervenches que l'on trouve en Amérique du Nord et au Mexique et qui y est considérée comme une mauvaise herbe. Les larves ne mangent que les feuilles de l'asclépiade. Elles se nourrissent ainsi durant deux semaines avant de se muer en chrysalide et de donner ensuite naissance à un papillon. L'asclépiade joue un donc central dans la survie du monarque. Les auteurs de l'étude parue en 1999 dans la revue Nature avaient donné à manger aux larves des feuilles aspergées de pollen de maïs Bt résistant aux insectes. Les chercheurs ont constaté que 44 % des larves mouraient et que celles qui survivaient étaient plus petites que les larves qui avaient mangé des feuilles exemptes de pollen Bt.[51] La sensibilité des larves de papillons à certaines protéines Bt n'était en soi pas très surprenante. En effet, les larves de monarques et des papillons de nuit contre lesquelles les plantes Bt ont été conçues font partie de l'ordre des lépidoptères. Or, les protéines Bt sont utilisées depuis la seconde moitié du 20e siècle comme pesticide biologique et l'on savait déjà que son aspersion décimait les rangs de la population des lépidoptères.[53,54]

Toutefois, la grande question que posait l'étude de la revue Nature était de savoir si les larves pouvaient également entrer en contact avec le pollen Bt dans la nature et, dans l'affirmative, si elles étaient sensibles à toutes les protéines Bt ou à une ou plusieurs d'entre elles en particulier. L'étude de la revue Nature-se basait en effet sur du pollen qui produisait uniquement la protéine Cry1Ab.

Les asclépiades poussent dans les champs de maïs et aux alentours. Dans un champ, elles peuvent donc être aspergées d'assez grandes quantités de pollen durant la floraison. Mais comme elles sont considérées comme une mauvaise herbe, les fermiers les éliminent autant que possible. Si elles poussent hors du champ, elles doivent se situer suffisamment près de celui-ci pour être couvertes de pollen de maïs. En outre, le pollen de maïs doit s'accrocher aux feuilles de l'asclépiade précisément au moment où les papillons pondent leurs œufs et où les larves éclosent. Le ministère américain de l'Agriculture et plusieurs universités ont alors décidé de mener une étude à grande échelle afin de vérifier si les monarques couraient un risque dans leur milieu naturel.

Les différentes études, publiées en commun dans l'édition de septembre 2001 de la revue Proceedings of the National Academy of Sciences USA (PNAS), ont conclu que le risque couru par le papillon monarque est infinitésimal.[55-60] Des quantités irréalistes de pollen Bt avaient été utilisées dans la première étude publiée dans la revue Nature. La plupart des variétés de plantes Bt produisent de trop petites quantités de protéines Bt dans leur pollen pour qu'elles nuisent aux papillons dans les champs. Cependant, la concentration de protéines Bt varie selon les variétés de plantes Bt. Une des variétés, à savoir la Bt176, produit beaucoup plus de protéines Bt dans son pollen que d'autres variétés de maïs (parce que le gène Bt est contrôlé par un promoteur spécifique de pollen). Dans le cas du Bt176, la concentration de Bt sur les asclépiades peut atteindre un taux nocif pour les monarques.[55] Par ailleurs, la variété de maïs Bt176 est moins performante dans le champ. Au tournant du siècle, elle occupait 2 % de la surface agraire aux États-Unis. La concentration élevée de protéine Bt dans le pollen de cette variété a été l'élément décisif entraînant l'arrêt de la commercialisation de cette variété peu rentable.[52] Une autre observation importante concernait le fait que le pic de production du pollen de maïs constaté dans la partie méridionale des zones d'essai ne coïncidait pas avec la présence de larves sur les asclépiades. C'est seulement dans les zones septentrionales qu'un chevauchement a été identifié dans la moitié des cas. Environ 50 % des larves comptées durant la période du test étaient présentes durant la floraison des plants de maïs.[56] Ce nombre semble élevé, mais les asclépiades sur lesquelles les papillons déposent leurs œufs ne poussent pas uniquement dans les champs de maïs et aux alentours. Les simulations supposaient que cette situation se présentait dans 56 % des cas.[56,58] En outre, si l'on tient compte du chevauchement maximal entre la présence des larves et la floraison du maïs (62 %),[56] du degré d'adoption de la culture du maïs Bt aux États-Unis (93 %)[7] et de la probabilité que le pollen des plantes Bt actuellement cultivées ait un effet néfaste sur les larves de monarque (0,7 %),[58] 0,2 % des monarques courrait un danger. Ce risque est négligeable par rapport à celui auquel les monarques sont exposés lors de l'aspersion d'un champ de maïs par des produits Bt ou d'autres produits phytosanitaires.

Ces études parues dans PNAS démontrent clairement qu'il est crucial d'évaluer les risques pour les organismes non cibles et que le mécanisme d'action sous-jacent des plantes résistantes aux insectes doit être le plus spécifique possible. Idéalement, les substances répulsives présentes dans les plantes Bt ne devraient être produites que dans les parties de la plante sujettes aux attaques d'insectes. Le pollen, qui peut être une source de nourriture pour les insectes utiles et dont d'autres plantes (comme les asclépiades) peuvent être recouvertes, doit contenir la plus faible concentration possible de ces produits. C'est le cas pour les plantes Bt cultivées à l'heure actuelle. Les études PNAS ont également permis de mettre en évidence le fait que les réactions soulevées par l'article initial paru dans la revue Nature étaient disproportionnées. Or, les études PNAS ont très peu attiré l'attention des médias, probablement parce que leur publication a coïncidé avec les attentats perpétrés aux États-Unis le 11 septembre 2001.

Rendement par unité de surface

La demande mondiale croissante de produits agricoles destinés à l'alimentation humaine et animale et à la fabrication de carburants exerce une lourde pression sur l'environnement et sur la surface agraire disponible. Moins le rendement par hectare de terre agricole est élevé, plus il faut sacrifier des aires de végétation naturelle pour les transformer en terres cultivables. La culture d'une plante à faible rendement a donc sur l'environnement un impact négatif qu'il convient de ne pas sous-estimer. La maîtrise de l'extension de la surface agraire est essentielle pour prévenir la perte de végétation naturelle et de biodiversité.

Entre 1965 et 2004, la population mondiale a doublé et chaque personne a en moyenne consommé 10 % de nourriture en plus.[61] Pourtant, la surface agraire n'a augmenté que de 2 %, grâce à un meilleur rendement par hectare, fruit de la Révolution verte. Cette révolution agricole, survenue de 1960 à 1980, a été marquée par l'avènement des engrais, des produits phytosanitaires et des techniques d'irrigation et a coïncidé avec le développement de variétés végétales répondant de manière optimale aux engrais.[62] Les économistes Evenson et Rosegrant ont calculé qu'en 2000, la surface agraire aurait augmenté de 3 à 5 % si les plantes agricoles n'avaient pas été génétiquement améliorées par sélection végétale depuis 1965.[63] Cela représente une économie de 9 à 12 millions d'hectares de terres cultivables dans les pays développés et de 15 à 20 millions d'hectares dans les pays en développement. L'économie totale de 24 à 32 millions d'hectares réalisée grâce à l'évolution de la technologie entre 1965 et 2000 correspond plus ou moins aux données récentes publiées par James Stevenson de la FAO (Food and Agriculture Organization) et ses collègues américains.[61] Sur la base d'un modèle faisant intervenir un plus

grand nombre de paramètres, ils ont calculé qu'une surface agricole supplémentaire de 18 à 27 millions d'hectares aurait été nécessaire en 2004 si les cultures agricoles avaient conservé leur rendement de 1965. Ils estiment que 12 à 18 millions de cette surface ont été préservés dans les pays en développement et que la déforestation de 2 millions d'hectares aurait ainsi été évitée.

Ces calculs montrent que les rendements accrus par hectare ont réduit l'extension de la surface agraire. Cependant, des aspects socioéconomiques locaux peuvent gâcher ce tableau idyllique. Car si une meilleure productivité est nécessaire pour éviter l'extension de la surface agraire et la déforestation, cela ne suffit pas. Une hausse de la productivité par hectare améliore l'efficacité des activités agricoles sur le plan financier, ce qui peut en soi stimuler l'agrandissement des surfaces agraires. Une productivité accrue par hectare peut également faire baisser le prix, donc augmenter la demande et, partant, la production. Paradoxalement, les nouvelles technologies peuvent donc contribuer à étendre les terres cultivables. C'est la raison pour laquelle des scientifiques britanniques et brésiliens ont récemment appelé les responsables politiques à prendre des mesures,[64] comme l'imposition de sanctions économiques (impôts, subventions), la préservation de zones naturelles dans les terres agricoles et la délivrance de certificats.[64] Bien que des plantes à haut rendement soient d'une absolue nécessité à l'heure actuelle, il n'empêche qu'une meilleure surveillance, combinée à une politique agricole réfléchie des autorités locales, demeure essentielle pour lutter contre l'extension des terres arables.

Dispersion des gènes par le pollen (transfert vertical de gènes)

Le risque de pollinisation croisée entre plantes cultivées et variantes sauvages a toujours existé et le transfert de gènes entre plantes améliorées et espèces sauvages croisables a lieu depuis l'invention de l'agriculture. Plusieurs éléments déterminent la probabilité d'une dispersion des gènes par le pollen :[65]

- le mode de transmission du pollen (vent, insectes), la distance entre les plantes et la durée de vie du pollen ;
- la synchronisation de la floraison des plantes ;
- la compatibilité sexuelle ou la capacité des deux plantes à produire une descendance féconde ;
- l'écologie de la population sauvage et la mesure dans laquelle le gène obtenu peut offrir un avantage sélectif aux espèces sauvages.

Toutefois, la technique utilisée pour améliorer les plantes (croisement, sélection par mutation, technologie OGM) n'influence aucunement l'impact de la propagation des gènes dans la nature. En effet, cet impact dépend entièrement des gènes et donc des propriétés codant les gènes répandus.

Comparons la culture du riz doré (une variante de riz OGM synthétisant de la provitamine A dans le grain), la culture d'une variété de soja non OGM et la culture d'un maïs non OGM résistant aux insectes. Les deux dernières plantes ont donc été obtenues au moyen de techniques de sélection végétale classiques et pas en recourant à la technologie OGM. La probabilité de la propagation de la production de provitamine A du riz OGM vers les variétés de riz sauvage est aussi grande que la probabilité de propagation de la tolérance aux herbicides du soja non OGM aux plantes voisines qui peuvent se croiser avec le soja. Il en va de même pour la propriété de résistance aux insectes. Pourtant, l'impact est très différent. Dans le cas du riz OGM, les plantes voisines pourraient hériter de la capacité à produire de la provitamine A, une propriété présente partout dans la nature aujourd'hui et qui n'entraîne aucun avantage sélectif pour la plante. Dans le cas du soja non OGM, les plantes voisines pourraient hériter de la tolérance à certains herbicides qui ne pourront donc plus être utilisés pour les éliminer. Cet avantage concerne uniquement les plantes situées à proximité de la zone où l'herbicide est appliqué. Dans les zones où l'herbicide n'est pas utilisé, les plantes sauvages ne tirent aucun avantage de la tolérance aux herbicides. Il en va autrement pour la résistance aux insectes. À l'introduction de cette propriété dans des variantes sauvages, ces plantes deviennent mieux armées contre les insectes, même en dehors du cadre agricole, ce qui peut leur procurer un certain avantage et avoir un effet sur la diversité.

En d'autres termes, la dispersion de gènes dans la nature n'a d'incidence sur l'environnement que si le gène peut offrir un avantage sélectif aux plantes croisables avec la plante cultivée. Les plantes sauvages obtenant un avantage sélectif de cette manière peuvent perturber l'équilibre écologique existant et causer la disparition d'autres plantes. Par conséquent, le choix de la propriété est un aspect important de l'analyse des risques qui doit précéder une éventuelle autorisation de culture. Curieusement, la réglementation impose uniquement cette analyse pour les plantes OGM, bien que l'exemple ci-dessus montre justement que la technologie d'amélioration végétale est d'une importance secondaire par rapport à la propriété intrinsèque de la plante. La propagation de gènes parmi une population n'a pas d'impact sur l'environnement tant que ces gènes ne perturbent pas l'équilibre écologique existant.

D'un point de vue socioéconomique, la propagation des gènes doit faire l'objet d'une évaluation différente, surtout dans le cas des plantes OGM. Dans certains cas, l'agriculteur, l'industrie alimentaire et le consommateur veulent pouvoir opérer un choix délibéré entre différents types

de production. Ainsi, les plantes génétiquement modifiées sont autorisées dans l'agriculture conventionnelle, mais pas dans l'agriculture biologique. Afin de respecter cette liberté de choix et d'éviter un préjudice économique dans le secteur du bio (perte du label bio), des directives ont été établies pour réduire au minimum la dispersion de gènes de champs OGM vers des champs de culture conventionnelle ou biologique. Du point de vue légal, l'introduction involontaire de propriétés OGM dans des produits bio n'entraîne pas la perte du label bio si le taux de pénétration est inférieur à 0,9 %, mais dans les faits, le secteur bio pratique une tolérance zéro à l'égard des OGM.

Le projet PRICE pour « PRactical Implementation of Coexistence in Europe », financé par l'Union européenne, montre que les plantes OGM et sans OGM peuvent coexister moyennant une certaine tolérance, tant dans la culture que dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire. Dans le cadre du projet PRICE, l'on a vérifié l'effet des mesures de coexistence déjà en place en Europe concernant la dispersion de gènes de maïs OGM vers des champs de maïs non OGM adjacents. Plusieurs initiatives semblent efficaces pour éviter un mélange significatif de produits OGM et non OGM.[66] En Europe, le seuil de tolérance est fixé à 0,9 %. Ce seuil de 0,9 % est important, parce que lorsqu'un produit contient un ingrédient issu à plus de 0,9 % d'une plante OGM, il doit être étiqueté en Europe comme un produit contenant des organismes génétiquement modifiés.

Afin d'éviter la dispersion de gènes par la pollinisation, des distances minimales doivent être respectées entre les champs OGM et les champs non OGM. Ces distances varient en fonction des plantes. Pour une plante comme la pomme de terre qui produit peu, voire pas de pollen et qui se multiplie par tubercules, une distance de cinq mètres s'avère suffisante.[4] S'agissant du maïs, une récente étude conduite au Mexique – le berceau du maïs – a démontré qu'une distance minimale de 20 mètres permet de maintenir la propagation des gènes entre

les plantes OGM et non OGM sous la barre des 0,9 %.[67] En Flandre également, des chercheurs ont vérifié la compatibilité de la culture de maïs OGM avec la culture de maïs conventionnel ou biologique.[68] L'étude conduite par l'ILVO (Institut flamand de recherche sur l'agriculture et la pêche) a conclu que la distance de séparation de 50 mètres fixée par le gouvernement flamand est largement suffisante pour maintenir la contamination des lots conventionnels par le pollen disséminé par le vent sous le seuil de 0,9 %. Au moyen d'essais en champ, le projet PRICE a démontré que si un champ OGM et un champ non OGM sont séparés de moins de 20 mètres, il est encore possible d'éviter la dispersion des gènes en établissant une zone tampon entre le maïs OGM et le maïs non OGM.[69] Une zone de 12 rangées de maïs non OGM s'avère suffisante à cette fin. Une autre solution consiste à semer le maïs OGM et le maïs non OGM à des époques différentes. Si l'on respecte un intervalle de quatre semaines au mois d'avril, ou de deux semaines au mois de mai, entre l'ensemencement du maïs OGM et du maïs non OGM, une plante OGM peut même être cultivée à côté d'un champ de maïs non OGM sans craindre la moindre dispersion de gènes par le pollen.[69]

Autrement dit, il est possible d'exclure la dissémination des gènes dans le champ. Toutefois, des mesures supplémentaires sont nécessaires afin d'obtenir une séparation complète entre les produits OGM et non OGM, comme le nettoyage des machines servant à la récolte et l'étiquetage correct des produits récoltés. Ces mesures supplémentaires garantissant la liberté de choix entraînent cependant des frais additionnels.

L'AFFAIRE CHAPELA

En octobre et novembre de l'année 2000, Ignacio Chapela et son doctorant David Quist collectent des épis de maïs de races primitives dans l'État d'Oaxaca au Mexique.[70] Les races primitives de maïs (ou variétés locales) sont maintenues et améliorées par les fermiers et cultivateurs locaux qui les cultivent année après année dans de petits champs. Au fil du temps, ces variétés ont subi une évolution génétique due à l'intervention de l'homme et aux conditions ambiantes. Les races primitives sont une source importante de diversité et sont fortement appréciées par la population locale. Afin de conserver un degré élevé de diversité, il est recommandé de ne pas cultiver les races primitives aux côtés de variétés commerciales. En effet, certaines propriétés dominantes des variétés commerciales risqueraient d'être introduites dans les races primitives, ce qui pourrait procurer à certaines d'entre elles un avantage sélectif par rapport aux autres espèces sauvages. En raison de cette inquiétude et étant donné que la technologie OGM n'a été utilisée jusqu'à présent que pour améliorer les variétés commerciales, le Mexique n'autorise pas la culture du maïs OGM actuel. En 2001, Chapela et Quist créent donc la surprise en rapportant dans la très sérieuse revue Nature qu'ils ont retrouvé des fragments d'ADN de maïs OGM dans l'ADN des six races primitives de maïs sur lesquelles portaient leurs recherches.[70]

Les écologistes et les défenseurs de l'environnement lèvent le poing en apprenant cette nouvelle. À leurs yeux, c'est bien la preuve que les cultures OGM peuvent « contaminer » d'autres plantes et causer la disparition de variétés locales. Par contre, ces résultats n'étonnent pas les scientifiques. La reproduction sexuelle est l'un des phénomènes les plus naturels au monde. Depuis que le maïs existe, les plants ont échangé des gènes entre eux par la pollinisation. Rien ne pourrait donc expliquer un comportement différent de plants OGM féconds. Les races primitives contiennent sans aucun doute de l'ADN issu de variétés commerciales et ces dernières de l'ADN de races primitives, même si cela est plus difficile à démontrer. Le Mexique n'a jamais autorisé la culture commerciale de maïs OGM, ce qui ne veut pas dire que tous les agriculteurs ont respecté cette interdiction. Chaque année, le Mexique importe de grandes quantités de maïs OGM à des fins alimentaires. Les semences de maïs OGM sont donc présentes en abondance au Mexique et l'on sait que certains fermiers utilisent ces semences pour une nouvelle culture ou les mélangent avec les semences qu'ils ont récoltées lorsqu'ils en manquent.[71] La culture de plants de maïs OGM parmi les races primitives ou à proximité de celles-ci a donc pu entraîner l'introduction d'une ou plusieurs semences dans les épis des espèces sauvages, ce qui expliquerait qu'ils contiennent des fragments d'ADN de maïs OGM. En tout cas, ces fragments d'ADN ne sont pas capables de causer la disparition des races primitives. Inversement, des fragments d'ADN des races primitives peuvent aussi se retrouver dans une ou plusieurs semences de plants de maïs OGM.

En outre, les données fournies par Chapela et Quist ne sont pas très claires. Les auteurs ont analysé en une fois toutes les semences de maïs contenues dans un épi et n'ont identifié qu'un très faible signal de la présence de matériel OGM. Dans les années qui suivent, d'autres laboratoires répéteront le dispositif d'expérience de Chapela et Quist et parviendront à des résultats différents. L'une de ces études a ainsi analysé 870 plants répartis dans 125 champs situés dans 18 régions du Mexique. La présence d'ADN de plants OGM n'a été détectée dans aucune des 153 746 semences analysées.[72] En 2009, une autre étude a cependant démontré la présence d'ADN de plants OGM dans des races primitives mexicaines, mais selon une fréquence bien inférieure.[73]

La dernière étude a donc confirmé les observations de Chapela et Quist selon lesquelles du matériel ADN de maïs OGM peut être présent dans des variétés de maïs mexicaines. L'agitation qu'a entraînée la publication de l'article dans la revue Nature avait cependant une autre cause. La surprise et l'inquiétude des scientifiques concernaient deux autres thèses développées par Chapela et Quist. Dans la revue Nature, les auteurs laissent en effet entendre qu'une introgression s'est produite.[70] Il s'agit d'un phénomène par lequel l'ADN d'une plante (p. ex. une plante OGM) est intégré de manière stable dans l'ADN d'une autre plante (p. ex. une race primitive) à la suite de rétrocroisements répétés sur plusieurs années et finit par donner naissance à une nouvelle race ou à un hybride intermédiaire. Durant ce processus d'introgression, une quantité toujours plus importante d'ADN de la première plante parent (p. ex. le maïs OGM) subsiste dans le nouvel hybride au détriment de l'ADN de la seconde plante parent (p. ex. la variété de maïs locale). Si rien n'est fait pour conserver les variétés locales, il est donc possible que les gènes de races locales disparaissent d'une population. Chapela et Quist n'ont fourni aucune donnée pour étayer l'hypothèse de l'introgression. Toutes les semences de maïs d'un épi ont été analysées en une seule opération et seul un signal positif très infime a été détecté. Le maïs OGM qu'ils ont utilisé comme contrôle positif dans l'expérience émettait un signal très puissant, ce qui implique la production d'un nombre très limité de semences dans les épis de maïs des races primitives après pollinisation par du pollen OGM. Afin de vérifier l'hypothèse de l'introgression, Chapela et Quist auraient dû analyser en premier lieu les feuilles des races primitives et non pas les semences. En outre, ils auraient dû planter les semences « positives » et vérifier si un croisement avait effectivement eu lieu entre la plante OGM et la race primitive dans la génération suivante. Ces expériences n'ont pas été conduites. L'irritation des scientifiques par rapport à cet article paru dans la revue Nature était donc surtout une réaction aux recherches bâclées de Chapela et Quist qui avaient omis d'exécuter de simples expériences de contrôle.[74,75]

Les conclusions de Chapela et Quist révèlent une deuxième erreur notable. En effet, les auteurs affirment que les fragments d'ADN des plantes OGM se comportent différemment de l'ADN des races primitives. Selon les chercheurs, certains fragments d'ADN circulent de manière incontrôlée dans l'ADN des races primitives de maïs. La communauté scientifique a réservé un accueil très froid à cette hypothèse totalement contraire aux connaissances acquises au bout de plusieurs décennies de recherches moléculaires. En outre, Chapela et Quist se basent sur des résultats obtenus par le biais de la technique PCR inverse, une méthode très susceptible de produire des résultats erronés.[74,75] Cette technique est utile à condition que les résultats soient contrôlés a posteriori pour les confirmer ou les invalider. Chapela et Quist n'ont pas réalisé d'expériences de contrôle et leurs résultats peuvent être expliqués très simplement par l'inconvénient de la technique PCR inverse, à savoir la production de résultats erronés.[74,75] La publication de Chapela et Quist est un exemple malencontreux de recherche mal menée qui passe à travers les mailles du filet d'un contrôle qualité généralement très strict exercé par des revues telles que Nature. Heureusement que des scientifiques réagissent à la publication de tels articles pour corriger les hypothèses erronées.

Transfert horizontal de gènes

La dispersion du pollen telle que décrite précédemment peut entraîner le transfert d'informations génétiques d'un parent à sa descendance. C'est ce qu'on appelle le transfert vertical de gènes. Mais le transfert de gènes peut également être « horizontal ». Dans ce cas, des gènes sont échangés entre organismes sans reproduction sexuelle. C'est la spécialité des bactéries,[76] qui s'avèrent extraordinairement habiles à intégrer et à échanger de l'ADN entre elles. Au cours de l'évolution, d'autres organismes (comme les plantes, les mites et les nématodes) ont repris des informations génétiques d'organismes tiers, en général de bactéries. C'est ainsi que le transfert horizontal de gènes a contribué au processus d'adaptation de certains organismes au changement de conditions de vie et a même entraîné, dans des cas isolés, l'apparition de nouvelles espèces.[77]

Le transfert horizontal de gènes a soudainement fait son entrée dans le débat sur les plantes OGM à l'occasion de la controverse suscitée par les gènes de résistance aux antibiotiques, soit les gènes qui protègent un organisme contre l'effet nocif d'un antibiotique. Ces gènes sont de moins en moins utilisés dans le cadre du développement de plantes OGM en raison de leur connotation négative, alors qu'ils étaient abondamment utilisés à l'aube de la technologie OGM (dont les plantes OGM actuellement utilisées sont issues). À l'époque,

un gène de résistance aux antibiotiques était intégré avec le gène d'intérêt dans l'ADN des plantes afin de permettre une sélection efficace des plantes OGM en laboratoire parmi le vaste groupe de plantes OGM et non OGM. Mais les chercheurs se sont vite inquiétés de savoir si ces gènes de résistance aux antibiotiques contenus dans les plantes OGM pouvaient être transférés à des bactéries (ou d'autres organismes tels que des champignons) dans le sol, puisque ces gènes provenaient initialement de bactéries. Des dizaines d'études ont alors été effectuées en laboratoire et sur le terrain. On dénombre ainsi 59 études rien que la pour la période comprise entre 2002 et 2012.[78] Il est apparu que la fréquence du transfert horizontal de gènes de plantes vers d'autres organismes (dont les bactéries) est extrêmement faible et n'a encore jamais pu être démontrée sur le terrain.[76] Ce n'est que dans les conditions artificielles d'un laboratoire que l'on a observé le transfert, entre une plante et une bactérie, d'un fragment d'ADN très similaire dans la plante et dans la bactérie et selon une très faible fréquence (de 1 pour 10 000 à 1 pour 100 millions).[79,80]

Dans le cas très improbable où un gène de résistance aux antibiotiques serait transféré d'une plante OGM dans une bactérie, il importe d'identifier le gène de résistance aux antibiotiques concerné. Ces gènes se répartissent en trois groupes selon leur utilisation en médecine humaine ou vétérinaire et en fonction de leur présence dans l'environnement.[1] Dans le cadre du processus d'élaboration de plantes OGM commerciales, l'Union européenne autorise uniquement l'utilisation de gènes de résistance aux antibiotiques déjà largement présents dans la nature ou qui ne revêtent aucune importance ou tout au plus une importance secondaire en médecine. Des institutions (inter)nationales chargées du contrôle de la sécurité de l'alimentation et de l'environnement telles que l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) veillent à ce que ce soit bien le cas.

Invasivité

L'introduction de plantes ou d'animaux dans une région où ils ne sont pas encore présents doit toujours faire l'objet d'une surveillance attentive. En effet, de nombreux exemples du passé montrent que l'insertion délibérée ou non de certains animaux ou plantes a eu des conséquences dramatiques pour la faune et la flore d'une région. Il suffit de rappeler l'importation de lapins en Australie ou de la jacinthe d'eau sud-américaine qui colonise le lac Victoria au Kenya depuis 1992. Aux États-Unis, l'invasion de champs et de sites naturels par le kudzu, une plante grimpante asiatique, en est un autre exemple.[81] Le kudzu a été introduit aux États-Unis à la fin du 19e siècle pour ombrager les portiques et cours intérieures. Promu au titre de plante fourragère au début du 20e siècle, il a en outre été planté en abondance pour prévenir l'érosion des terres arables. En raison de conditions climatiques idéales, de l'absence de maladies et de fléaux et de son élimination très difficile, la plante s'est depuis lors propagée à une vitesse foudroyante. Elle couvre chemins et ponts, maisons, poteaux téléphoniques et pylônes à haute tension et étouffe la végétation locale. Dans le sud des États-Unis, le kudzu a d'ailleurs été surnommé « la vigne qui a mangé le Sud ».[81]

Globalement, l'introduction d'une nouvelle propriété dans une plante peut entraîner sa prolifération de deux manières. D'une part, la nouvelle propriété peut entraîner une expansion effrénée de la plante dans un milieu agricole. D'autre part, elle peut se propager à des variantes sauvages par croisement.

Un exemple hypothétique de la première situation est la résistance de la pomme de terre au gel. Une fois la récolte des pommes de terre terminée, quelques pommes de terre subsistent toujours involontairement dans le sol. La majorité mourra sous l'effet du gel en hiver et ne formera pas de mauvaises herbes au printemps suivant. En revanche, les pommes de terre qui auront résisté au gel germeront peut-être au printemps et feront partie des mauvaises herbes à la récolte suivante.

La propagation d'un gène de résistance à la sécheresse à une espèce sauvage est un exemple hypothétique de la seconde situation. Au fil du temps, la descendance de cette plante pourra se répandre dans des régions plus sèches où elle sera susceptible de supplanter d'autres plantes. Si les plantes opprimées constituaient un meilleur habitat pour certains insectes par exemple, l'écosystème et la biodiversité en seront alors perturbés à différents niveaux.

Afin d'estimer correctement le risque d'invasivité, il faut également tenir compte de la région d'origine de la plante. Par exemple, le maïs a été importé d'Amérique du Sud. Il n'existe pas de maïs « sauvage » dans nos contrées. En Europe, il n'y a donc aucun risque que le maïs OGM influence les populations de maïs endémique. Il en va de même pour la pomme de terre et d'autres plantes originaires d'autres continents. Des pays tels que les États-Unis, l'Argentine et le Brésil, où le soja est cultivé à grande échelle, ne comptent pas de variétés sauvages de soja parce que la plante a été importée d'Asie.

Kudzu, une plante originaire d'Extrême-Orient qui étouffe des arbres entiers aux États-Unis.

4 Effets indirects d'une plante (OGM) sur l'environnement par un changement de la pratique culturale

Outre l'effet direct de la propriété d'une plante sur l'environnement, les pratiques agricoles associées à la culture d'une plante spécifique peuvent également affecter l'environnement. Par exemple, la culture de plantes résistantes aux herbicides permet aux agriculteurs de moins labourer, ce qui entraîne des effets positifs considérables sur la structure du sol et les organismes vivant dans le sol. La culture irraisonnée de plantes résistantes à un seul insecte conduira à l'apparition d'insectes résistants.

Transition vers une agriculture sans labour

Contrairement aux plantes résistantes aux maladies qui procurent un avantage environnemental très direct en raison de la réduction des pesticides requis (voir page 15), les plantes tolérantes aux herbicides dépendent de l'utilisation d'herbicides. Néanmoins, des cultures tolérantes aux herbicides, en particulier la culture de plantes résistantes au glyphosate, peuvent offrir un avantage environnemental manifeste à condition de mettre en œuvre les pratiques agricoles adéquates.

Les cultures tolérantes à des herbicides à large spectre comme le glyphosate sont les alliées d'une agriculture sans labour. Il s'agit d'une forme d'agriculture dans laquelle le sol n'est pas ou peu perturbé. Cela signifie en général que le sol n'est pas retourné mais seulement ameubli. Après la récolte, la terre est cassée et émiettée à l'aide de dents qui raclent le sol mais n'occasionnent pas le moindre déplacement de terre. Le « semis direct », ou encore l'agriculture sans labour au sens strict, est une technique plus extrême. Elle exclut toute forme de travail du sol. Le sol est couvert en permanence de cultures ou de résidus de cultures précédentes. Seul un sillon est pratiqué dans le sol pour les semailles et la terre ne subit aucune autre perturbation.

L'agriculture sans labour offre plusieurs avantages environnementaux importants (voir supra à la page 11). Tout d'abord, elle améliore la santé du sol : la vie dans le sol est beaucoup moins perturbée, le risque d'érosion diminue et la portance du sol augmente. Un moindre recours au labour mécanique constitue le deuxième avantage de l'agriculture sans labour. Une présence moins fréquente des machines dans le champ signifie une moins grande consommation de carburant et, partant, moins d'émissions de CO_2. Selon les économistes agricoles anglais Graham Brookes et Peter Barfoot, le travail d'un hectare dans le système sans labour nécessite 27 litres de carburant en moins en période de végétation.[3] En se fondant sur ces chiffres, Brookes et Barfoot ont calculé que la mise en œuvre, en 2013, de la technique sans labour grâce à une culture tolérante aux herbicides avait permis une économie de 785 millions de litres de carburant. Sachant que la consommation d'1 litre de carburant entraîne l'émission de 2,7 kilogrammes de CO_2, l'économie de carburant réalisée a épargné la production de 2 millions de tonnes de CO_2.[3] Pour rendre ces chiffres plus concrets, Brookes et Barfoot ont estimé que pour la seule année 2013, cela équivalait à retirer 931 000 voitures de la circulation pendant toute une année. En extrapolant ces données jusqu'à l'époque de l'introduction des plantes OGM tolérantes aux herbicides en 1996, l'agriculture sans labour aurait permis d'émettre 16,8 millions de tonnes de CO_2 en moins, puisque 6,3 milliards de litres de carburant ont été économisés. Cela équivaut à retirer de la circulation près de 7,5 millions de voitures pendant un an.[3]

Jeunes plants de soja poussent dans les résidus de blé de la culture précédente. L'agriculture sans labour aide à retenir l'humidité et évite l'érosion. ©Tim McCabe. Avec la permission de l'USDA National Resources Conservation Service.

Les plantes tolérantes au glyphosate, l'herbicide auquel la plupart des plantes tolérantes aux herbicides résistent, offrent un avantage supplémentaire sur le plan environnemental. Par rapport à d'autres herbicides, le glyphosate est beaucoup moins nocif pour l'environnement.[82] Ainsi, depuis l'introduction des cultures tolérantes au glyphosate, l'on note une baisse considérable de l'impact des herbicides sur l'environnement. Pour le soja, la diminution de l'impact environnemental peut être chiffré à 14,5 % à l'échelle mondiale, pour le maïs à 13,5 % et jusqu'à 28 % pour les cultures de colza tolérantes aux herbicides.[3]

Plantes tolérantes au glyphosate : le mieux est l'ennemi du bien

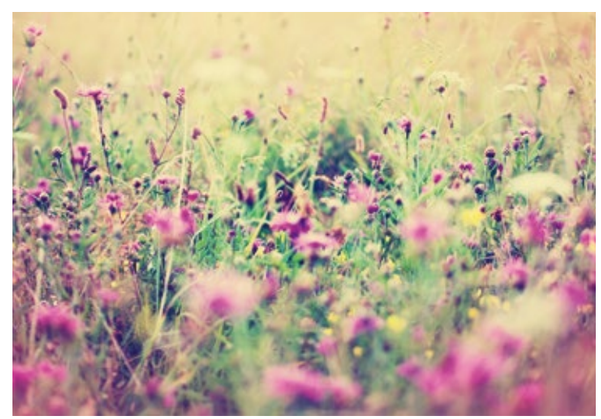
Bien que, ces seize dernières années, la culture tolérante aux herbicides ait été plus écologique que la culture conventionnelle, l'on continue de s'interroger sur l'impact d'une culture à grande échelle de ce type de plante. C'est surtout la culture du soja tolérant aux herbicides qui semble être la victime de son propre succès. Enthousiasmés par les coûts de production réduits de la culture du soja génétiquement modifié et par la demande croissante de produits de soja, les cultivateurs de soja argentins et brésiliens n'ont pas tardé à étendre leurs surfaces de production.[83,84] Les modèles mathématiques estiment que plus de 8,6 millions d'hectares supplémentaires ont été plantés à cause de la disponibilité d'un soja résistant aux herbicides.[85] Vu que la culture du soja OGM est financièrement plus intéressante, en raison d'une demande de soja sans cesse accrue et de pluies plus abondantes dans les forêts sèches de Chaco, de vastes étendues ont même été

déboisées en Amérique du Sud.[86,87] Cependant, le risque de déforestation n'est pas une raison justifiant l'interdiction des cultures tolérantes aux herbicides, mais plutôt la protection des forêts concernées.

Cette gigantesque surface de culture du soja suscite également des inquiétudes par rapport aux effets négatifs d'une monoculture. En plus d'épuiser certains nutriments du sol,[88] les cultures tolérantes aux herbicides pratiquées à grande échelle entraînent l'utilisation d'un même herbicide sur de très grandes étendues. Dans le cas des plantes tolérantes au glyphosate, il s'agit du glyphosate. Sous l'effet d'actions menées par des groupements de défense de l'environnement, cet herbicide est considérablement décrié depuis plusieurs années. Selon la quantité dans laquelle ils sont utilisés, tous les produits, des herbicides tels que le glyphosate compris, ont un effet nocif sur l'environnement. Certains pesticides ont même été retirés du marché en raison de leur impact trop important. C'est le cas du DDT. Des analyses de risques strictes et une surveillance continue sont donc essentielles pour réduire le plus possible l'impact des produits phytosanitaires. Cependant, contrairement au DDT, l'image négative véhiculée par le glyphosate n'est pas confirmée par des données scientifiques. En comparaison avec la plupart des autres herbicides, le glyphosate a même moins d'incidence sur l'environnement.[89] Néanmoins, l'usage massif de glyphosate dans les cultures de plantes tolérantes au glyphosate n'est pas une bonne évolution. Mais lorsque les plantes tolérantes aux herbicides sont cultivées de manière réfléchie en respectant les pratiques agricoles adéquates, elles peuvent contribuer indirectement à une baisse significative de l'impact de l'agriculture sur l'environnement en favorisant une agriculture sans labour.

Résistance aux herbicides

L'utilisation de produits phytosanitaires doit toujours avoir lieu de manière réfléchie. Ainsi, il est impératif d'alterner les produits utilisés. Si cette logique agricole n'est pas respectée, le risque existe que des insectes, champignons, mauvaises herbes, etc. s'adaptent et développent une résistance au produit. Étant donné que la culture d'une plante tolérante à un herbicide est associée à l'utilisation d'un herbicide spécifique, il est primordial de recourir également à d'autres moyens de lutte contre les mauvaises herbes (mécaniques ou chimiques). À défaut, il y fort à parier que les mauvaises herbes deviendront tolérantes à l'herbicide. Toutefois, elles ne



deviendront pas des « super mauvaises herbes » qui résistent à tout, mais des mauvaises herbes que l'herbicide auquel elles seront devenues résistantes ne pourra plus tuer. Dans ce scénario, les mauvaises herbes subsistent alors après le traitement du champ et l'efficacité de la culture de la plante tolérante à l'herbicide régresse sensiblement, ce qui est très néfaste du point de vue agricole. Les cultivateurs ont donc tout intérêt à suivre le plus rigoureusement possible le code de bonnes pratiques agricoles. Ce débat ressemble beaucoup à celui mené sur les antibiotiques. Ce ne sont pas les antibiotiques qui sont à l'origine de l'apparition de bactéries nosocomiales résistantes, mais bien leur utilisation irréfléchie et excessive.

Toutes les mauvaises herbes ont la capacité de développer une résistance à n'importe quel herbicide. Une tolérance à certains herbicides avait déjà été constatée dans les champs bien avant la mise au point de la première plante OGM. Des mauvaises herbes (*Conyza bonariensis* et *Conyza sumatrensis*) résistantes au glyphosate ont ainsi été signalées en Grèce, un pays qui interdit toute culture de plantes OGM et où des plantes tolérantes au glyphosate n'ont encore jamais été cultivées.[86] C'est également le cas de la France où l'on a observé le développement d'une ivraie (*Lolium rigidum*) tolérante au glyphosate.[86] En d'autres termes, les mauvaises herbes résistantes ne le sont pas toutes devenues consécutivement à la culture de plantes tolérantes à un herbicide. C'est l'utilisation à grande échelle du glyphosate aux États-Unis qui a permis cette résistance au niveau local et l'a accélérée. En Amérique du Nord et du Sud, l'introduction de plantes tolérantes aux herbicides a rapidement connu un grand succès. Tout le monde était tellement enthousiasmé par cette

méthode simple d'élimination des mauvaises herbes qu'une grande majorité des agriculteurs a commencé à cultiver ces plantes tolérantes aux herbicides. Le choix du type de tolérance aux herbicides était limité et ce sont principalement des plantes tolérantes au glyphosate qui ont été commercialisées. En Argentine, il n'a pas fallu huit ans avant que la quasi-totalité des cultivateurs troquent leur soja conventionnel contre du soja tolérant au glyphosate.[88] En 2012, 93 % de la production totale de soja aux États-Unis était issue de soja tolérant à un herbicide.[90] Le risque de voir se développer des mauvaises herbes insensibles est conditionné par deux facteurs : l'utilisation massive d'un herbicide et les schémas de culture. En certains endroits d'Amérique du Nord et du Sud où il est possible de faire se succéder deux cultures de soja en un an de temps, les cultivateurs ont souvent opté, année après année, pour deux cultures de soja tolérantes au glyphosate. À d'autres endroits, le soja tolérant au glyphosate était alterné avec du maïs tolérant au glyphosate. Ces deux schémas défient le bon sens. En se fiant exagérément au glyphosate comme seul désherbant et en ne respectant pas les principes culturaux essentiels, de gigantesques surfaces ont été traitées, année après année, au moyen du même herbicide. Ce que l'on redoutait a donc fini par se produire. Moins de 10 ans après l'introduction de plantes tolérantes au glyphosate, les premières mauvaises herbes tolérantes à cette substance sont apparues tant en Argentine qu'aux États-Unis.[84] Dans certaines régions, les agriculteurs ont donc commencé à appliquer plus de glyphosate que les doses initialement nécessaires ou, dans certains cas, à réutiliser d'anciens herbicides plus nocifs. Par conséquent, l'on observe un effondrement de l'avantage environnemental ayant découlé du changement initial

d'utilisation des herbicides. Ainsi, l'avantage environnemental procuré par la culture du soja tolérant au glyphosate en Argentine est passé de 21 % en 2004 à seulement 1 % en 2013.[7,91]

Pourtant, il y a moyen d'agir autrement. Au Canada, le colza tolérant aux herbicides est cultivé en alternance avec du froment et du seigle et ne pousse donc dans un même champ que tous les quatre ans.[92] En outre, les agriculteurs peuvent recourir à deux propriétés de tolérance aux herbicides distinctes. Ils alternent ainsi le colza OGM tolérant au glyphosate avec la variante tolérante au glufosinate. Le glyphosate et le glufosinate sont deux herbicides qui agissent de manière totalement différente.[84] Autrement dit, une mauvaise herbe insensible au glyphosate sera éliminée l'année suivante par le glufosinate. En 2010, 6,5 millions d'hectares de colza ont ainsi été cultivés au Canada, dont 47 % de colza tolérant au glyphosate (OGM), 46 % de colza tolérant au glufosinate (OGM), 6 % de colza tolérant à l'imazamox/imazapyr (non OGM) et 1 % de colza conventionnel.[89,93] Grâce à l'alternance des plantes cultivées et du type de tolérance aux herbicides, le Canada n'a constaté, depuis le lancement des cultures OGM tolérantes aux herbicides, aucune augmentation anormale des mauvaises herbes tolérantes aux herbicides.[86] Dès lors, pour peu que les plantes tolérantes aux herbicides soient correctement utilisées, le risque de voir apparaître des mauvaises herbes tolérantes n'augmente pas. Le même phénomène est relevé en Australie. Avant l'introduction de plantes OGM tolérantes aux herbicides, l'Australie était confrontée à des mauvaises herbes devenues tolérantes à certains herbicides.[94] Les fermiers australiens ont tiré un enseignement de leurs mauvaises techniques culturales et lorsque les plantes OGM tolérantes aux herbicides ont été disponibles, ils les ont immédiatement utilisées mais avec prudence. Aucune prolifération de mauvaises herbes tolérantes n'est constatée dans ce pays.

Même si l'utilisation excessive de glyphosate témoigne d'un manque de discernement dans la gestion des mauvaises herbes, toute la responsabilité ne peut pas être imputée aux agriculteurs. Les autorités, les producteurs d'applications tolérantes aux herbicides et les organisations agricoles auraient dû contrôler et documenter l'utilisation des herbicides ainsi que la situation des cultures et intervenir le cas échéant. La biotechnologie végétale permet d'accomplir bien des choses, mais l'introduction d'une plante OGM ne doit pas se faire au mépris des principes de base de bonnes pratiques agricoles.

Maïs conventionnel (à gauche) est affecté par les pyrales du maïs. Le maïs Bt (à droite) est résistant aux insectes

Résistance au Bt

Tout comme les mauvaises herbes peuvent développer une résistance aux herbicides, les insectes peuvent également s'adapter aux produits phytosanitaires, voire à des pratiques culturales visant à maîtriser leur population. Aux États-Unis, la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*) cause des ravages dans les champs de maïs. Les larves se nourrissent des racines des plants, entraînant dégâts et pertes de rendement, alors que les coléoptères auxquels les larves donnent naissance se nourrissent des feuilles et des épis. Aux États-Unis, la chrysomèle des racines du maïs est maintenue sous contrôle grâce à une rotation annuelle des cultures de maïs et de soja. Le soja produisant des inhibiteurs de protéases à cystéine (voir page 14), les larves ne peuvent pas survivre sur les racines du soja et le risque d'infection diminue. Au fil des années, les larves se sont cependant adaptées au soja. La rotation des cultures s'avère donc inefficace et l'invasion des chrysomèles des racines du maïs ne peut plus être maîtrisée. La cause de l'apparition de la résistance tient à un changement intervenu dans les bactéries intestinales des insectes.[95]

Afin de prévenir la résistance dans des organismes tels que les mauvaises herbes, les insectes et les champignons, la protection des végétaux doit être intégrée et donc faire appel simultanément à différents moyens ou techniques pour lutter contre un fléau déterminé. Cela a trop peu été le cas dans le passé. La chrysomèle des racines du maïs a ainsi pu s'adapter aux plantes Bt résistantes aux insectes et dès lors affaiblir l'efficacité de la rotation des cultures du maïs et du soja. Des expériences menées en laboratoire ont mis rapidement en évidence que

les insectes peuvent s'adapter relativement vite aux protéines Bt. Après une sélection de huit générations, il a pu être démontré dès la fin des années 1990 que le foreur de tiges européen pouvait développer une résistance à une plante Bt spécifique.[96] Vu le succès remporté par le coton Bt et le maïs Bt, le plus grand cauchemar des cultivateurs est que des insectes tels que le charançon du cotonnier deviennent à la longue insensibles aux protéines Bt. Si cela devait se produire, les plantes Bt combattraient moins efficacement les dégâts causés par les insectes et il faudrait repartir de zéro. C'est pourquoi les autorités et les producteurs ont encouragé les agriculteurs à prendre certaines mesures au niveau des cultures afin de prévenir l'émergence d'insectes résistants aux protéines Bt (voir encadré « Contenir la résistance aux protéines Bt par de bonnes pratiques agricoles »). Dans certains cas, ces mesures de précaution sont trop peu suivies.[97] Entre-temps, l'on a identifié dans les champs cinq espèces d'insectes qui résistent à une protéine Bt. La protection offerte par les plantes Bt correspondantes (maïs comme coton) se révèle peu efficace dans certaines régions.[97]

Les cultivateurs peuvent combattre la résistance aux protéines Bt en adoptant de bonnes pratiques agricoles. Par ailleurs, le producteur porte également sa part de responsabilité. Si nous voulons produire de manière durable, mieux vaut éviter les plantes possédant un mécanisme de défense unique. En outre, les autorités peuvent encourager les bonnes pratiques agricoles et condamner les monocultures. En effet, la manière la plus efficace de réprimer une résistance consiste à amener la plante à produire simultanément différents mécanismes de défense. Le maïs et le coton qui possèdent deux ou plusieurs protéines Bt différentes actives contre un même insecte ont un système de défense plus durable. Si le risque d'être confronté à une résistance à une seule protéine Bt est de l'ordre de 1 sur 100 000, la probabilité de voir se développer une résistance à deux protéines Bt différentes en même temps est de 1 sur 10 milliards. Cela se vérifie également pour les plantes améliorées par des techniques conventionnelles, même si l'on ignore la plupart du temps sur quoi cette résistance est basée et si un ou plusieurs mécanismes de défense sont impliqués.

Pour clore ce chapitre, remarquons également que les insectes qui résistent à une ou plusieurs protéine(s) Bt ne sont pas tous apparus dans la foulée de la culture de plantes Bt. La résistance d'insectes à certaines protéines Bt a été observée avant même la culture commerciale de plantes Bt.[98] Cette résistance était due à l'utilisation d'aérosols à base de Bt.

CONTENIR LA RESISTANCE AUX PROTEINES BT PAR DE BONNES PRATIQUES AGRICOLES

Il convient de prendre plusieurs éléments en considération pour prévenir la résistance aux protéines Bt. La première est la « règle de la dose ». Cette règle est l'une des pierres angulaires du contrôle des insectes résistants aux protéines Bt. Les plantes Bt doivent produire une dose suffisamment élevée de protéines Bt pour tuer la grande majorité (> 99 %) des insectes cibles. Si la dose est trop faible et que certains insectes survivent après s'être nourris de protéines Bt, ils pourront s'y adapter progressivement et engendrer une descendance qui sera également moins sensible. Dans un tel scénario, un champ Bt serait envahi d'insectes résistants aux protéines Bt à une vitesse phénoménale.

La deuxième mesure essentielle consiste à cumuler les mécanismes de défense. La probabilité qu'une mutation spontanée de l'ADN d'un insecte entraîne une résistance à une protéine Bt est infime. Cette faible probabilité se réduit encore considérablement si l'on contraint une plante à synthétiser deux protéines Bt actives contre le même insecte mais possédant chacune leur propre mécanisme d'action. En effet, un charançon du cotonnier devenu résistant à la première toxine restera sensible à l'autre. Par conséquent, l'insecte finira par être tué et la résistance acquise disparaîtra de la population. Les cultivateurs australiens, indiens et américains ont bien compris le message. Quelque 90 % des plants de coton Bt indiens contiennent à présent deux mécanismes de défense et ce pourcentage atteint même 100 % en Australie et aux États-Unis.[7,99] Le risque que ces insectes brisent les défenses de la plante s'en voit donc réduit. Néanmoins, le mécanisme de défense multiple ne doit pas être considéré comme une solution miracle car des mesures doivent être prises pour assurer son efficacité. Par exemple, les plantes possédant un mécanisme de défense unique ne peuvent pas être cultivées aux côtés de plantes possédant un mécanisme de défense multiple. En effet, les insectes auraient le temps de s'adapter progressivement et la défense multiple serait anéantie beaucoup plus rapidement. Aux États-Unis, du coton OGM produisant une ou deux protéines Bt différentes a été cultivé entre 2004 et 2010. Aujourd'hui, la fréquence de résistance aux deux protéines Bt dépasse 50 % parmi certains insectes. En Australie, toutes les races de coton Bt à défense unique ont été remplacées en une fois par du coton à double résistance et la fréquence de résistance s'élève actuellement à moins de 1 %.[99]

La « règle du refuge » est une dernière mesure culturale importante. Aux États-Unis, en Australie et dans d'autres pays, les autorités ont imposé aux agriculteurs qui cultivent du coton Bt ou du maïs Bt l'obligation de semer, à côté de leurs champs Bt, des bandes de coton ou de maïs non Bt (zones refuges). Lorsqu'un insecte devient résistant, il s'accouplera ainsi de préférence avec un insecte sensible au Bt présent dans la zone refuge. Si la mutation produit une propriété génétique récessive, les descendants d'un tel croisement seront sensibles au Bt. Si ces œufs sont pondus sur une plante Bt, les larves seront tuées après s'en être nourries et la résistance disparaîtra du champ. On cherche à réaliser un scénario comparable en propageant des insectes adultes stériles.[100] Élevés en laboratoire, ces insectes sont irradiés afin d'être inaptes à la reproduction. Les insectes stériles sont ensuite propagés en grand nombre dans les champs. Vu la pléthore d'insectes stériles, les insectes du champ Bt éventuellement devenus résistants s'accoupleront en premier lieu avec les insectes stériles. Dans ce cas, il n'y aura pas de descendance et la résistance s'éteindra progressivement. C'est ainsi qu'entre 2006 et 2009, pas moins de 2 milliards de mites Pectinophora gossypiella stériles (le « ver rose du cotonnier ») ont été répandues (ou 25 000 mites stériles par hectare et par an) dans les champs de coton de l'État de l'Arizona. Le programme d'élimination a porté ses fruits : en 2009, seules deux larves ont été comptées dans 16 600 capsules de coton, contre 2 550 en 2005. Le taux d'infection est donc passé de 15,3 % à 0,012 %, soit un recul de 99,9 %. Un même recul a été observé dans le nombre de mites capturées chaque semaine dans les pièges à insectes.[101]

Protection indirecte supplémentaire des cultures

Une étude de grande envergure menée en Chine a analysé la présence de coccinelles, chrysopes et araignées dans les champs de coton Bt en prélevant des mesures sur une période de 20 ans à différents endroits du territoire.[102] Les données recueillies indiquent que le nombre de ces insectes utiles et araignées a augmenté, une hausse que les chercheurs imputent intégralement à une diminution de l'utilisation d'insecticides à large spectre. Comme la capsule de coton ne doit plus être contrôlée au moyen d'aspersions d'insecticides à large champ d'action, d'autres insectes présents dans le champ de coton ne sont plus tués. Les coccinelles, chrysopes et araignées sont souvent qualifiés de prédateurs parce qu'ils sont les ennemis naturels des insectes ravageurs. En d'autres termes, ces prédateurs peuvent contrôler ces fléaux de manière naturelle. C'est la raison pour laquelle on a recours par exemple à des coccinelles et à des ichneumons dans la culture biologique de légumes sous serre. Les chercheurs chinois ont remarqué que ces prédateurs utiles se répandaient dans les champs de maïs, d'arachide et de soja environnants. Ils sont également parvenus à maîtriser des insectes ravageurs parmi les plantes non BT voisines, ce qui a également réduit la nécessité de traiter les champs non Bt.[102] Les champs non OGM environnants bénéficient donc non seulement d'une moins grande prévalence des maladies, mais également de populations plus nombreuses d'insectes utiles. Autrement dit, la technologie Bt peut considérablement soutenir un mode d'agriculture recourant moins aux pesticides chimiques et s'orientant davantage vers la maîtrise des fléaux par des moyens biologiques.

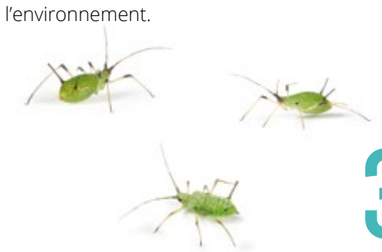
Les effets positifs identifiés dans l'étude chinoise ne peuvent pas être directement extrapolés à d'autres études, car l'effet des cultures Bt sur des organismes non cibles dépend à la fois de la plante et de l'insecte. En 2007, la revue Science a publié une méta-analyse qui reposait sur 42 expériences de terrain menées parmi un vaste éventail d'insectes non cibles.[103] Cette analyse a mis en évidence que certains organismes non cibles étaient présents en moins grand nombre dans les champs Bt par rapport aux champs de contrôle exempts d'insecticides. Toutefois, leur nombre dans les champs Bt était bien plus important que dans les champs traditionnellement traités avec des insecticides. Une étude publiée ultérieurement, fondée sur 21 études de terrain supplémentaires, est parvenue à la même conclusion.[36]

La baisse du nombre d'insectes dans les champs Bt par rapport aux champs non Bt non traités peut avoir une double explication. D'une part, il peut s'agir d'un effet toxique, du fait que des organismes non cibles sont directement affectés par les plantes Bt ou indirectement par la consommation d'insectes proies qui se sont nourris de plantes Bt. D'autre part, il peut s'agir d'un effet écologique. Certains insectes (prédateurs) sont moins présents parce qu'ils doivent chercher leurs proies ailleurs puisque les insectes proies sensibles sont moins nombreux dans le champ. Les données de la dernière grande méta-analyse vont dans le sens d'un effet écologique.[36] En effet, les études conduites en laboratoire ont démontré que certains prédateurs présents en moins grand nombre dans un champ Bt n'étaient pas eux-mêmes sensibles aux protéines Bt. Pour leur survie, ces prédateurs dépendent presque exclusivement des chenilles des pyrales du maïs. Étant donné que les plantes Bt ont été mises au point précisément pour combattre les pyrales du maïs, il est évident qu'il y a moins de prédateurs dans les champs Bt. Il convient cependant d'observer que si les pyrales du maïs sont contrôlées d'une autre manière (p. ex. par pulvérisation de Bt ou par d'autres moyens), les prédateurs spécifiques seront également moins nombreux. Les deux méta-analyses ont produit comme principale conclusion qu'une comparaison entre les champs Bt et les champs non Bt traités par insecticides révèle une présence plus marquée d'insectes utiles dans les champs Bt.[36,103]

Fléaux secondaires

L'usage réduit d'insecticides dans la culture de plantes Bt résistantes aux insectes peut avoir un effet négatif direct dans certaines circonstances. Dans le cadre d'une étude de terrain menée sur dix ans dans la province de Heibei située dans le nord de la Chine, des chercheurs chinois ont constaté une hausse graduelle de la population de punaises dans les champs de coton Bt.[104] Ces punaises sont sensibles aux insecticides à large spectre utilisés contre le charançon du cotonnier dans les cultures de coton conventionnelles. Mais l'utilisation plus limitée d'insecticides dans les champs de coton Bt affaiblit le contrôle des punaises, qui peuvent alors proliférer et devenir des fléaux secondaires. Le ver gris occidental du haricot, qui affecte le maïs, pose un problème similaire aux États-Unis. Cet insecte n'est que très peu sensible au maïs Bt cultivé à l'heure actuelle. Vu la forte diminution de l'utilisation d'insecticides à large spectre et la présence plus faible d'insectes contrôlés par le maïs Bt, cet insecte pullule davantage qu'avant l'introduction du maïs Bt.[105]

Alors que les opposants à la technologie OGM affirment que ces données prouvent que la technologie Bt n'est pas une solution durable, ces résultats montrent au contraire les effets positifs des plantes Bt dans la pratique. Les protéines Bt présentes dans les plantes ont une action tellement spécifique contre les insectes cibles que d'autres insectes tels que les punaises et pucerons ne sont pas tués lorsqu'ils se nourrissent de la plante. En outre, ces organismes non cibles ne peuvent devenir un fléau qu'en cas d'utilisation d'une moins grande quantité de pesticides à large spectre dans les champs Bt. Il est possible de prévenir ces fléaux secondaires, soit en développant et en intégrant dans les plantes Bt une résistance génétique additionnelle, soit en cherchant d'autres méthodes de protection des plantes (moyens biologiques ou insecticides à action plus spécifique). Une protection à caractère plus biologique est possible précisément parce qu'on utilise moins de produits phytosanitaires. À court terme, il se peut cependant que des cultivateurs recourent aux insecticides initiaux parce que c'est le moyen le plus simple et le moins cher. La technologie Bt n'est pas une solution miracle qui règlera tous les problèmes de culture en une fois. En revanche, c'est un outil important qui permettra d'évoluer progressivement vers une agriculture durable ayant l'impact le plus minime possible sur l'environnement.



5 Analyse européenne des risques environnementaux d'une culture OGM

En Union européenne, une plante OGM peut être cultivée à des fins commerciales après avoir été soumise à une analyse de risques. La réglementation européenne en la matière est très stricte et implique un nombre extrêmement élevé d'analyses. Une entreprise souhaitant commercialiser une plante OGM doit introduire un dossier volumineux contenant les résultats des analyses demandées. Le dossier est ensuite vérifié en détail par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) ou par l'un des États membres de l'Union européenne. La décision finale d'autoriser ou non la culture OGM demandée est prise par la Commission européenne et les États membres. Nous décrivons dans les paragraphes qui suivent, sous un angle assez technique, les types d'analyse que doit contenir le dossier de demande. Pour commencer, il est utile de faire remarquer que la procédure de régularisation extrêmement stricte que doivent subir les plantes OGM auprès des agences de sécurité alimentaire officielles ne s'applique pas aux plantes ayant obtenu certaines propriétés au moyen des techniques d'amélioration classiques et de sélection par mutation. Sur le plan scientifique, il serait logique d'évaluer les nouvelles plantes sur la base de leurs nouvelles propriétés et non en fonction de la méthode d'amélioration ayant servi à adapter leur génome.

Une étude comparative avec la variante non OGM

En 2010, le groupe OGM de l'EFSA a établi des directives auxquelles une demande de culture doit satisfaire.[106] En Europe, le dossier de demande d'autorisation de culture d'une plante OGM doit comprendre une étude de sécurité alimentaire (du moins pour l'alimentation humaine et animale) ainsi qu'une étude environnementale. Les expériences réalisées et évaluées dans le cadre de cette étude de sécurité alimentaire sont amplement décrites dans le dossier de référence « La sécurité alimentaire des plantes génétiquement modifiées ».[1] Les données fournies par l'étude environnementale doivent mettre les États membres de l'Union européenne et l'EFSA en mesure de vérifier si l'introduction d'une plante OGM spécifique dans l'environnement est susceptible d'avoir des effets néfastes pour l'environnement, la santé des êtres humains ou celle des animaux. Sont analysées, dans ce cadre, à la fois les conséquences recherchées et les conséquences involontaires éventuelles de la modification génétique. Les effets recherchés sont les effets pour lesquels la plante OGM a été mise au point. Par exemple, l'effet recherché d'une plante résistante aux insectes est de réduire les dégâts causés par des ravageurs spécifiques. Les effets involontaires peuvent notamment résulter de différences entre la plante OGM et la plante non OGM, par exemple au niveau de l'emplacement des gènes dans l'ADN de la plante. Afin de pouvoir identifier les éventuels effets involontaires, une étude comparative est réalisée sur la plante OGM et la variante non OGM.

Par ailleurs, le dossier de demande doit également comporter des analyses spécifiques de l'interaction entre la plante OGM et l'environnement. Pour chaque analyse décrite ci-après, nous identifions d'abord les aspects de la plante OGM qui sont susceptibles d'avoir un effet négatif pour l'environnement. Le risque réel est ensuite déterminé en tenant compte de l'exposition de l'environnement aux éventuels aspects négatifs de la plante OGM.

Invasivité et transfert vertical de gènes dans d'autres plantes

L'introduction de plantes ou d'animaux dans une région où ils ne sont pas encore présents doit toujours faire l'objet d'une surveillance attentive. En effet, de nombreux exemples du passé montrent que l'insertion délibérée ou non de certains animaux et plantes a eu des conséquences dramatiques pour la faune et la flore d'une région (voir page 28).

S'agissant de l'invasivité, l'EFSA prend ce risque en considération à deux niveaux. D'une part, il y a la possibilité que la plante OGM ou des parents sauvages de la plante OGM ayant reçu une propriété OGM par croisement (voir page 22) prolifèrent dans le champ. Dans l'affirmative, il faudrait par exemple appliquer des stratégies de désherbage plus intensives qui, à leur tour, pourraient nuire plus gravement à l'environnement. D'autre part, l'EFSA tient compte de l'effet que la propriété OGM pourrait avoir à l'extérieur du champ. Les plantes ayant reçu la propriété OGM risquent en effet de proliférer aux dépens d'autres plantes, ce qui réduirait la biodiversité. Certaines espèces d'animaux ou d'insectes qui se nourrissent de la plante ou l'utilisent pour se

protéger ou se reproduire pourraient également en subir les effets.

Dans le cadre de l'évaluation d'un changement potentiel en termes d'invasivité, on vérifie d'abord si les caractéristiques biologiques générales, comme le pouvoir germinatif de la semence de la plante OGM, ont été modifiées. Si ce n'est pas le cas, le risque d'invasivité dépend dans les deux cas de la mesure dans laquelle la propriété OGM influence la prolifération et de la probabilité que la propriété OGM puisse être transférée dans des variantes sauvages par croisement (transfert vertical de gènes). L'évaluation de ce risque est donc presque entièrement tributaire de la propriété OGM et de l'espèce végétale utilisée (Tableau 1). Les données sur lesquelles cette analyse de risques repose proviennent d'une part de la littérature scientifique et, d'autre part, du demandeur de la procédure d'autorisation.[106]

Propriété	Plante
Plantule ou pouvoir germinatif	Biologie de la reproduction
Dormance ou mesure dans laquelle les plantes peuvent être au repos pendant plusieurs années sans perdre leur pouvoir germinatif	Dispersion du pollen, des semences, tubercules, bulbes, etc. dans l'environnement
Taux de croissance du semis	Viabilité du pollen, des semences, tubercules, bulbes, etc. dans le temps
Production de semences	Présence de variantes sauvages
Résistance au stress abiotique (froid, sécheresse...)	Adapté aux conditions de croissance
Résistance au stress biotique (champignons, insectes...)	

Tableau 1. Exemples de facteurs stimulant l'invasivité et la propagation involontaire d'une propriété intrinsèque d'une plante pris en considération dans le cadre de l'analyse de risques effectuée par l'EFSA.

Transfert horizontal de gènes entre une plante et des micro-organismes

Les cultures peuvent entraîner la dispersion d'ADN végétal (donc également d'ADN d'une plante OGM) dans l'environnement: feuilles tombant sur le sol et digérées par des organismes vivant dans le sol, résidus de racines et éteules de maïs, par exemple, traînant dans le champ, animaux et insectes se nourrissant de matériel végétal vivant ou mort, etc. Dans son analyse de risques, l'EFSA tient compte de la possibilité d'un transfert de l'ADN d'une plante dans des micro-organismes tels que des bactéries et des champignons, un processus appelé « transfert horizontal de gènes » (voir page 27). Dans le cadre de l'analyse de risques, l'on étudie la probabilité du transfert du fragment d'ADN ajouté dans des micro-organismes non OGM. Le risque d'un tel transfert horizontal de gènes est extrêmement faible. Cependant, lorsqu'il existe une grande similitude entre le fragment d'ADN ajouté à la plante OGM et des fragments d'ADN d'un micro-organisme, ce risque peut s'accroître. Il en va de même lorsqu'il existe pour le micro-organisme un avantage sélectif potentiel à intégrer le fragment d'ADN supplémentaire ou lorsque le matériel végétal OGM ne se dégrade pas et reste présent longtemps dans l'environnement. Tous ces facteurs sont pris en considération.

L'on évalue également l'effet potentiel d'un tel transfert horizontal de gènes pour l'homme, l'animal et l'environnement. L'utilisation de gènes de résistance aux antibiotiques fait l'objet d'une attention particulière dans ce cadre. Pour de plus amples informations, nous vous renvoyons au dossier de référence « La sécurité alimentaire des plantes génétiquement modifiées ».[1]

Interaction entre la plante OGM et les organismes cibles

Les plantes résistantes aux ravageurs ou aux maladies ont développé des stratégies qui leur permettent d'écarter certains insectes, bactéries, champignons ou virus, par exemple en produisant certaines protéines telles que les protéines Bt issues de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (voir encadré « Applications OGM actuelles » ou dossier de référence « Du coton Bt en Inde »[34]) qui sont nocives pour les insectes. Les organismes cibles sont les organismes contre lesquels une stratégie a été mise au point. Tous les autres organismes sont considérés comme des organismes non cibles (voir paragraphe suivant). Il va de soi que l'on préfère écarter les organismes cibles le plus efficacement possible sans affecter les organismes non cibles. L'EFSA (ou l'un des États membres de l'Union européenne) réalise une analyse de risques afin d'estimer la mesure dans laquelle cette situation peut se présenter dans la culture OGM spécifique au sujet de laquelle elle doit formuler un avis scientifique. Cette évaluation tient compte notamment du mécanisme d'action de la protéine introduite qui assure la défense de la plante ainsi que du cycle de vie de l'organisme cible, des différents hôtes utilisés par l'organisme cible, de la répartition et de la mobilité géographiques de l'organisme cible, etc.

En outre, le demandeur doit également soumettre à l'EFSA les stratégies culturales qui seront mises en place afin que le système de

défense de la plante puisse être maintenu le plus longtemps possible. En effet, les insectes, bactéries et champignons s'adaptent à des circonstances moins favorables, par exemple à la culture de plantes OGM possédant un mécanisme de défense ou à l'utilisation de produits phytosanitaires. Si l'on a recours à des plantes aptes à se défendre contre un insecte ou un champignon, des variantes d'insectes et de champignons apparaîtront au fil du temps, selon un processus sélectif, qui seront en mesure de contourner le mécanisme protecteur de la plante. Afin de réduire au maximum ce risque, le demandeur doit pouvoir démontrer que les organismes cibles seront repoussés de manière efficace. Ainsi, la production des molécules de défense doit être suffisamment importante (en fonction de l'ingestion de matériel végétal par l'assaillant) pour que l'insecte ne puisse pas survivre (voir encadré « Contenir la résistance aux protéines Bt par de bonnes pratiques agricoles »). Il faut également vérifier si les populations naturelles d'organismes cibles sont déjà armées pour briser les défenses des plantes. Par conséquent, l'évaluation tient aussi compte du risque potentiel que les organismes cibles puissent anéantir ces défenses. Cette gestion de la résistance n'est cependant pas demandée pour l'introduction de plantes qui ont été dotées d'un mécanisme de défense au moyen de techniques d'amélioration classiques, comme les pommes de terre Toluca, Bionics et Carolus.[4]

Interaction entre la plante OGM et les organismes non cibles

Un aspect important de l'analyse de risques préalable à l'autorisation de culture consiste à étudier si la plante OGM et sa culture peuvent engendrer un risque direct ou indirect pour les organismes non cibles. Comme expliqué précédemment, les organismes non cibles sont des organismes qui n'ont aucun effet néfaste sur la croissance ou le développement de la plante et qui, en d'autres termes, ne doivent pas être éliminés. Toutefois, les organismes non cibles peuvent être affectés involontairement tant par les nouvelles propriétés introduites dans une plante que par les mesures de culture spécifiques associées à la plante OGM. Si c'est le cas, la culture de la plante OGM peut influencer la biodiversité de l'écosystème.

Étant donné que tout écosystème abrite un très grand nombre d'organismes non cibles, il est impossible de tester la sensibilité directe ou indirecte de chacun d'entre eux. C'est pourquoi les organismes non cibles sont répartis en cinq catégories et un certain nombre de spécimens représentatifs de chaque groupe sont sélectionnés. Ces catégories sont les suivantes : phytophages, ennemis naturels, pollinisateurs, composteurs et symbiotes de plantes (espèces ayant un avantage à cohabiter avec la plante). Il convient de vérifier dans quelle mesure ces organismes peuvent entrer en contact avec la plante OGM, avec quelles parties de la plante, de quelle manière et à quel stade de leur cycle de vie. Il faut déterminer la mesure dans laquelle les organismes non cibles sont sensibles à la propriété intrinsèque des plantes OGM ou à un changement intervenant dans la pratique agricole, ainsi que leur abondance, leur mode d'interaction avec les organismes cibles et leur importance pour l'écosystème.[106]

Les analyses susmentionnées doivent non seulement concerner les interactions bitrophiques (plante/organisme non cible), mais également les interactions faisant intervenir plus de deux organismes différents (interactions multitrophiques). Un organisme (p. ex. un ver de terre) qui entre directement en contact avec la plante OGM (p. ex. une feuille tombée d'une plante résistante aux insectes) ne sera peut-être nullement affecté par la propriété de la plante, mais si cet organisme constitue la proie d'un autre organisme (p. ex. un oiseau), il ne peut être exclu que ce dernier ne subira pas d'effets négatifs après un certain laps de temps. En effet, certaines propriétés peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Toutes les données requises pour l'analyse de risques concernant les organismes non cibles sont obtenues à partir d'essais en laboratoire ou dans le cadre d'essais sur le terrain.

Toutes les analyses susmentionnées montrent clairement que le résultat de l'analyse de risques dépend considérablement de la plante cultivée, de la propriété introduite et de l'écosystème.

Impact des techniques de culture, de gestion et de récolte spécifiques

L'introduction d'une plante OGM dans le champ peut s'accompagner de changements spécifiques dans les techniques de culture, de gestion et/ou de récolte. L'incidence de ces changements sur l'environnement et la biodiversité doit également être analysée avant d'autoriser la culture d'une plante OGM.

Les plantes tolérantes aux herbicides constituent l'exemple le plus évident. La culture de ces plantes est indissociablement liée à l'utilisation d'un ou plusieurs herbicides spécifiques. Dans la plupart des cas, cela entraîne un changement au niveau de l'utilisation des herbicides, puisque les herbicides auxquels la plante est tolérante seront davantage utilisés alors que le recours aux autres herbicides diminuera. Il faut donc examiner l'effet produit, entre autres, sur la biodiversité dans le champ et aux alentours ainsi que la nature des conséquences directes et indirectes. Grâce à la gestion flexible et efficace des mauvaises herbes que permet la culture de certaines plantes tolérantes aux herbicides, l'agriculteur opte plus volontiers pour l'agriculture sans labour (voir page 31 et dossier de référence (en néerlandais) « Herbicide-tolerante soja in Argentinië »[84]). Cette forme d'agriculture est recommandée dans les régions où les sols sont sensibles à l'érosion pour améliorer la structure du sol, mais elle affecte considérablement la vie dans et sur le sol.

Effets sur les cycles biogéochimiques

Les cycles biogéochimiques comprennent le transport, le stockage et la transformation de l'énergie, de l'eau, du carbone, de l'azote et d'autres éléments dans l'écosystème. Il s'agit par exemple de l'absorption du CO_2 présent dans l'atmosphère par les plantes, de la dégradation des végétaux, de la formation d'une substance organique dans le sol, de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol, de la transformation de l'azote, etc. Les cycles biogéochimiques sont essentiels à la fertilité du sol mais contribuent à la perte de certains de ses composants en libérant p. ex. des gaz à effet de serre (CO_2, méthane et oxyde d'azote) néfastes pour l'environnement. Les demandeurs d'une autorisation de culture OGM doivent fournir des données permettant

de savoir si la plante OGM et le mode de culture correspondants sont susceptibles de nuire aux cycles biogéochimiques en comparaison avec les modes de production actuels et la variante non OGM.[106]

Effets sur l'homme et sur l'animal

Bien que la procédure d'autorisation de culture d'une plante OGM se concentre logiquement sur l'effet potentiel de la plante OGM et du mode de culture correspondant sur l'environnement, une analyse de risques vérifiant les effets potentiels sur la santé de l'homme et de l'animal doit également être effectuée dans ce cadre.[106] Les agriculteurs, les animaux et, dans une moindre mesure, les passants entrent en effet en contact avec les plantes agricoles ou sont exposés au pollen et à des substances provenant de ces plantes. Il faut donc pouvoir écarter toute possibilité que la culture d'une plante OGM entraîne un risque accru par rapport à une culture non OGM en termes de santé humaine et animale. Dès lors, ces plantes ou composants OGM, comme le pollen, doivent également être évalués au niveau de leur allergénicité et toxicité de contact. En outre, l'ingestion accidentelle ne peut être exclue, même pour des plantes non destinées à la consommation comme des fleurs à couper. Cette ingestion accidentelle est également prise en compte dans l'évaluation des risques. Dans la pratique, une plante OGM pour laquelle une autorisation de culture est demandée doit faire l'objet de deux analyses de risques, la première concernant ses effets potentiels sur l'environnement et la biodiversité et la seconde portant sur ses effets sur la santé de l'être humain et de l'animal.[1]

Surveillance consécutive à la mise sur le marché ou suivi des cultures commerciales

Lorsque l'EFSA remet un avis positif à la Commission européenne, les décideurs européens peuvent autoriser la culture d'une plante OGM. Outre l'analyse de risques préalable à l'autorisation de culture, le produit autorisé doit faire l'objet d'un suivi permanent sur le terrain, même après son approbation. Ce suivi vise principalement à vérifier si la plante est cultivée selon les conditions imposées, à confirmer les effets escomptés de la plante ou à identifier les effets indésirables éventuels. Par exemple, une plante tolérante aux insecticides ou résistante aux insectes doit faire l'objet d'un suivi pour détecter le développement éventuel de mauvaises herbes ou d'insectes résistants.

6 Conclusion

Le nombre de variables déterminant l'impact de l'agriculture sur l'environnement est extrêmement important. Outre le mode de culture, les propriétés intrinsèques d'une plante spécifique (potentiel de rendement, résistance à une maladie,...) jouent un rôle essentiel dans l'impact environnemental. Ces deux paramètres – mode de culture et propriétés de la plante – ne dépendent cependant pas de la technologie mise en œuvre pour améliorer la plante cultivée. Toutes les plantes améliorées, que ce soit en recourant aux techniques de sélection végétale « traditionnelles » ou à la technologie OGM, peuvent avoir une incidence sur l'environnement.

La réglementation établit pourtant une grande distinction entre les deux technologies. Alors que les produits obtenus par sélection végétale traditionnelle et par mutation peuvent être librement commercialisés sur le marché européen, des analyses de risques strictes sont requises pour identifier les effets potentiels de cultures OGM sur l'environnement. Dans ce cadre, les plantes OGM sont comparées aux plantes non OGM cultivées selon des pratiques agricoles conventionnelles.

Les plantes résistantes aux insectes, tolérantes à la sécheresse et résistantes aux virus ont des effets directs ou indirects sur l'environnement, comme toutes les plantes cultivées possédant des propriétés spécifiques. Ces effets peuvent être tantôt positifs, tantôt négatifs, mais allient les deux dans la plupart des cas. Il importe donc de réaliser l'analyse de risques de chaque dossier individuellement et d'évaluer l'impact environnemental de l'autorisation de culture sur la base d'une analyse coûts-bénéfices. En d'autres termes : quel est, par rapport aux avantages offerts par une culture donnée, l'impact environnemental acceptable et inacceptable ?

La portée des analyses de risques environnementaux et la réglementation sévère permettent de s'assurer que seules des plantes OGM dont l'impact négatif sur l'environnement n'est pas supérieur à celui des variantes non OGM sont mises sur le marché.

7 Références

1 Dossier de référence du VIB. Sécurité alimentaire des plantes génétiquement modifiées. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Pages/Achtergronddossier.aspx, (2015).
2 Dossier de référence du VIB. Van plant tot gewas: Het verleden, heden en de toekomst van plantenveredeling. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Documents/vib_facts_series_vanplanttotgewas.pdf, (2016).
3 Brookes, G. & Barfoot, P. Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996-2013: impacts on pesticide use and carbon emissions. GM crops & food, (2015).
4 Dossier de référence du VIB. Een schimmelresistente aardappel voor België. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Pages/Achtergronddossier.aspx, (2015).
5 http://www.adama.com/uk/en/our-solutions/herbicides/shogun.html.
6 United States Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2012. Disponible à la page Internet http://www3.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/US-GHG-Inventory-2014-Main-Text.pdf, (2014).
7 James, C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. ISAAA Brief No. 49. ISAAA: Ithaca, NY. Disponible à la page Internet http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/49/, (2014).
8 Dossier de référence du VIB. Virus-resistente papaja voor Hawaï. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Pages/Achtergronddossier.aspx, (2014).
9 Castiglioni, P. *et al.* Bacterial RNA chaperones confer abiotic stress tolerance in plants and improved grain yield in maize under water-limited conditions. Plant physiology 147, 446-455, (2008).
10 Soil Quality Institute, U. S. D. o. A. Agricultural Management Effects on Earthworm Populations. Soil Quality Agronomy Technical Note 11, 1-8, (2001).
11 Oerke, E. C. Crop losses to pests. J Agr Sci 144, 31-43, (2006).
12 Johnson, R. M. Honey bee toxicology. Annual review of entomology 60, 415-434, (2015).
13 Carpenter, S. R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105, 11039-11040, (2008).
14 Schindler, D. W. *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105, 11254-11258, (2008).
15 Hobbs, P. R. Conservation Agriculture: What is it and why is it important for future sustainable food production? Paper presented at international workshop on increasing wheat yield potential, Cimmyt, Obregon, Mexico, 20–24 March 2006. The Journal of Agricultural Science 145, 127-137, (2007).
16 Holland, J. M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. Agr Ecosyst Environ 103, 1-25, (2004).
17 Chamen, T. *et al.* Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. Soil Till Res 73, 161-174, (2003).
18 Hobbs, P. R. Conservation Agriculture: What is it and why is it important for future sustainable food production? Disponible à la page Internet http://www.ecaf.org/docs/aposolo/CA%20What%20Is%20It%20and%20Why%20Is%20It%20Important%20for%20Future%20Sustainable%20Food%20Production.pdf.
19 Alvarez, R. & Steinbach, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. Soil Till Res 104, 1-15, (2009).
20 Parmelee, R. W. *et al.* Earthworms and Enchytaeids in Conventional and No-Tillage Agroecosystems - a Biocide Approach to Assess Their Role in Organic-Matter Breakdown. Biol Fert Soils 10, 1-10, (1990).
21 USDA-NRCS. Conservation tillage and terrestrial wildlife. Disponible à la page Internet http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_022238.pdf, (1999).
22 Wang, Y. *et al.* Long-term impact of farming practices on soil organic carbon and nitrogen pools and microbial biomass and activity. Soil Till Res 117, 8-16, (2011).
23 Mathew, R. P., Feng, Y., Githinji, L., Ankumah, R. & Balkcom, K. S. Impact of No-Tillage and Conventional Tillage Systems on Soil Microbial Communities. Applied and Environmental Soil Science doi:10.1155/2012/548620, (2012).
24 USDA-NRCS. Conservation tillage and terrestrial wildlife. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_022238.pdf, (1999).
25 Eurostat. Agriculture, forestry and fishery statistics. Disponible à la page Internet http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistical-books/-/KS-FK-15-001, (2015).
26 (EPA), U. S. E. P. A. EPA Global Anthropogenic non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, EPA 430-R-06-003 (United States Environmental Protection Agency, 2006). Disponible à la page Internet https://www3.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/nonco2projections.html, (2012).
27 Joint Research Centre. Information on methane emission. Disponible à la page Internet http://edgar.jrc.ec.europa.eu/part_CH4.php, (2015).
28 Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Our food and agriculture in numbers. Disponible à la page Internet http://www.fao.org/assets/infographics/FAO-Infographic-food-ag-en.pdf, (2013).
29 Malakof, D. & Stokstad, E. Infographic: pesticide planet. Science 341, 730-731, (2013).
30 United States Environmental Protection Agency (EPA). Pesticides Industry Sales and Usage 2006 and 2007 Market Estimates Disponible à la page Internet https://www.epa.gov/pesticides/pesticides-industry-sales-and-usage-2006-and-2007-market-estimates, (2011).
31 Mithofer, A. & Boland, W. Plant defense against herbivores: chemical aspects. Annual review of plant biology 63, 431-450, (2012).
32 Vandenborre, G., Smagghe, G. & Van Damme, E. J. Plant lectins as defense proteins against phytophagous insects. Phytochemistry 72, 1538-1550, (2011).
33 Macedo, M. L., Oliveira, C. F. & Oliveira, C. T. Insecticidal activity of plant lectins and potential application in crop protection. Molecules 20, 2014-2033, (2015).
34 Dossier de référence du VIB. Bt-katoen in India. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Pages/Achtergronddossier.aspx, (2013).
35 Gaudana, S. B. & Bagchi, T. in Microorganisms in Environmental Management: Microbes and Environment (eds T. Satyanarayana & Narain Bhavdish Johri) 431-450 (Springer Netherlands, 2012).
36 Naranjo, S. E. Impacts of Bt crops on non-target invertebrates and insecticide use patterns. CAB reviews: Perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources 4, (2009).
37 Environmental Justice Foundation. The deadly chemicals in cotton. Disponible à la page Internet http://ejfoundation.org/sites/default/files/public/the_deadly_chemicals_in_cotton.pdf, (2007).
38 Hutchison, W. D. *et al.* Areawide suppression of European corn borer with Bt maize reaps savings to non-Bt maize growers. Science 330, 222-225, (2010).
39 Benbrook, C. M. Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U.S. - the first sixteen years. Environmental Sciences Europe 24, (2012).
40 ENSSER. Signatories No Scientific Consensus on GMO Safety as of 20 January 2015. Disponible à la page Internet http://www.ensser.org/fileadmin/user_upload/150120_signatories_no_consensus_lv.pdf, (2015).
41 Klein, A. M. *et al.* Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. Proceedings. Biological sciences / The Royal Society 274, 303-313, (2007).
42 European Union Reference Laboratory for honeybee health (EURL). A pan-European epidemiological study on honeybee colony losses 2012-2013. (2014).
43 Duan, J. J., Marvier, M., Huesing, J., Dively, G. & Huang, Z. Y. A meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (Hymenoptera: Apidae). PloS one 3, e1415, (2008).
44 Hendriksma, H. P., Hartel, S. & Steffan-Dewenter, I. Testing pollen of single and stacked insect-resistant Bt-maize on in vitro reared honey bee larvae. PloS one 6, e28174, (2011).
45 Rose, R., Dively, G. P. & Pettis, J. Effects of Bt corn pollen on honey bees: emphasis on protocol development. Apidologie 38, 368-377, (2007).
46 Hendriksma, H. P. *et al.* Effect of stacked insecticidal Cry proteins from maize pollen on nurse bees (*Apis mellifera carnica*) and their gut bacteria. PloS one 8, e59589, (2013).
47 Dai, P. L. *et al.* Effects of Bt cry1Ah corn pollen on immature worker survival and development of *Apis cerana cerana*. J Apicult Res 54, 72-76, (2015).
48 Wang, Y. Y. *et al.* Toxicological, Biochemical, and Histopathological Analyses Demonstrating That Cry1C and Cry2A Are Not Toxic to Larvae of the Honeybee, Apis mellifera. Journal of agricultural and food chemistry 63, 6126-6132, (2015).
49 Comas, C., Lumbierres, B., Pons, X. & Albajes, R. No effects of *Bacillus thuringiensis* maize on nontarget organisms in the field in southern Europe: a meta-analysis of 26 arthropod taxa. Transgenic research 23, 135-143, (2014).
50 Naranjo, S. E. Effects of GM Crops on Non-target Organisms. Plant Biotechnology: Experience and Future Prospects, A. Richroch *et al.* (eds.), (2014).
51 Losey, J. E., Rayor, L. S. & Carter, M. E. Transgenic pollen harms monarch larvae. Nature 399, 214, (1999).
52 Fedoroff, N. V. & Brow, N. M. Mendel in the kitchen, a scientist's view of genetically modified foods. Joseph Henry Press, Washington D.C., (2004).
53 Johnson, K. S., Scriber, J. M., Nitao, J. K. & Smitley, D. R. Toxicity of *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* to Three Nontarget Lepidoptera in Field Studies. Environmental Entomology 24, (1995).
54 Miller, J. C. Field Assessment of the Effects of a Microbial Pest Control Agent on Nontarget Lepidoptera. American Entomologist 36, 135-139, (1990).
55 Hellmich, R. L. *et al.* Monarch larvae sensitivity to *Bacillus thuringiensis*-purified proteins and pollen. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11925-11930, (2001).
56 Oberhauser, K. S. *et al.* Temporal and spatial overlap between monarch larvae and corn pollen. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11913-11918, (2001).
57 Pleasants, J. M. *et al.* Corn pollen deposition on milkweeds in and near cornfields. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11919-11924, (2001).
58 Sears, M. K. *et al.* Impact of Bt corn pollen on monarch butterfly populations: a risk assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11937-11942, (2001).
59 Stanley-Horn, D. E. *et al.* Assessing the impact of Cry1Ab-expressing corn pollen on monarch butterfly larvae in field studies. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11931-11936, (2001).
60 Zangerl, A. R. *et al.* Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and black swallowtail caterpillars under field conditions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98, 11908-11912, (2001).

61 Stevenson, J. R., Villoria, N., Byerlee, D., Kelley, T. & Maredia, M. Green Revolution research saved an estimated 18 to 27 million hectares from being brought into agricultural production. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110, 8363-8368, (2013).
62 Evenson, R. E. & Gollin, D. Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000. Science 300, 758-762, (2003).
63 Evenson, R. E. & Rosegrant, M. The impact of international agricultural research. Crops variety improvement and its effect on productivity, eds. Evenson RE, Gollin D . Disponible à la page Internet http://www.fao.org/docs/eims/upload/282053/9780851995496.pdf 473-497, (2003).
64 Phalan, B. *et al.* Conservation Ecology. How can higher-yield farming help to spare nature? Science 351, 450-451, (2016).
65 Dale, P. J., Clarke, B. & Fontes, E. M. G. Potential for the environmental impact of transgenic crops. Nat Biotechnol 20, 567-574, (2002).
66 PRICE. Assessment of flowering delays in combination with separation distances and buffer zones on coexistence. Newsletter 03/04. Disponible à la page Internet http://price-coexistence.com/page/downloads/Newsletter_03-04-01_-_Assesment_of_flowering_delays.pdf, (2015).
67 Baltazar, B. M. *et al.* Pollen-Mediated Gene Flow in Maize: Implications for Isolation Requirements and Coexistence in Mexico, the Center of Origin of Maize. PloS one 10, e0131549, (2015).
68 ILVO, De Vlaamse regelgeving omtrent co-existentie: een evaluatie in praktijkomstandigheden. Disponible à la page Internet http://www.ilvo.vlaanderen.be/Portals/0/Documents/Nieuws/Eindrapport_ma%C3%AFs_coexistentieproef.pdf, (2011).
69 PRICE. Assessment of flowering delays in combination with separation distances and buffer zones on coexistence. Newsletter 03/04. Disponible à la page Internet http://price-coexistence.com/page/downloads/Newsletter_03-04-01_-_Assesment_of_flowering_delays.pdf, (2015).
70 Quist, D. & Chapela, I. H. Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. Nature 414, 541-543, (2001).
71 Bellon, M. R. & Berthaud, J. Transgenic maize and the evolution of landrace diversity in Mexico. The importance of farmers' behavior. Plant physiology 134, 883-888, (2004).
72 Ortiz-Garcia, S. *et al.* Absence of detectable transgenes in local landraces of maize in Oaxaca, Mexico (2003-2004). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102, 12338-12343, (2005).
73 Pineyro-Nelson, A. *et al.* Transgenes in Mexican maize: molecular evidence and methodological considerations for GMO detection in landrace populations. Molecular ecology 18, 750-761, (2009).
74 Kaplinsky, N. *et al.* Biodiversity (Communications arising): maize transgene results in Mexico are artefacts. Nature 416, 601-602, (2002).
75 Metz, M. & Futterer, J. Biodiversity (Communications arising): suspect evidence of transgenic contamination. Nature 416, 600-601, (2002).
76 Keese, P. Risks from GMOs due to horizontal gene transfer. Environmental biosafety research 7, 123-149, (2008).
77 Fuentes, I., Stegemann, S., Golczyk, H., Karcher, D. & Bock, R. Horizontal genome transfer as an asexual path to the formation of new species. Nature 511, 232-235, (2014).
78 Nicolia, A., Manzo, A., Veronesi, F. & Rosellini, D. An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research. Critical reviews in biotechnology 34, 77-88, (2014).
79 Ceccherini, M. *et al.* Degradation and transformability of DNA from transgenic leaves. Applied and environmental microbiology 69, 673-678, (2003).
80 de Vries, J., Heine, M., Harms, K. & Wackernagel, W. Spread of recombinant DNA by roots and pollen of transgenic potato plants, identified by highly specific biomonitoring using natural transformation of an *Acinetobacter* sp. Applied and environmental microbiology 69, 4455-4462, (2003).
81 Blaustein, R. J. Kudzu's invasion into Southern United states life and culture. The Great Reshuffling: Human dimensions of invasive species. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. The World Conservation Union. McNeeley, J. A. ed., 55-62, (2001).
82 New York State Integrated Pest Management Program. The environmental impact of herbicides 2012. Disponible à la page Internet http://nysipm.cornell.edu/publications/eiq/files/EIQ_values_2012herb.pdf, (2012).
83 Grau, H. R., Gasparri, N. I. & Aide, T. M. Agriculture expansion and deforestation in seasonally dry forests of north-west Argentina. Environ Conserv 32, 140-148, (2005).
84 Dossier de référence du VIB. Herbicide-tolerante soja in Argentinië. Disponible à la page Internet http://www.vib.be/nl/educatie/PlantEnBiotech/Pages/Achtergronddossier.aspx, (2013).
85 Trigo, E. Fifteen years of genetically modified crops in Argentine agriculture. Disponible à la page Internet http://www.argenbio.org/adc/uploads/pdf/15_YEARS_OF_GM_CROPS_IN_ARGENTINE_AGRICULTURE.pdf (2011).
86 Gasparri, N. I. & Grau, H. R. Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). Forest Ecol Manag 258, 913-921, (2009).
87 Hoyos, L. E. *et al.* Deforestation and precipitation patterns in the arid Chaco forests of central Argentina. Appl Veg Sci 16, 260-271, (2013).
88 Trigo, E. Fifteen years of genetically modified crops in Argentine agriculture. Disponible à la page Internet http://www.argenbio.org/adc/uploads/pdf/15_YEARS_OF_GM_CROPS_IN_ARGENTINE_AGRICULTURE.pdf (2011).
89 New York State Integrated Pest Management Program. The environmental impact of herbicides 2012. Disponible à la page Internet http://nysipm.cornell.edu/publications/eiq/files/EIQ_values_2012herb.pdf, (2012).
90 James, C. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2012. ISAAA Brief 44, (2012).
91 Brookes, G. & Barfoot, P. GM Crops: The global economic and environmental impact - The first nine years 1996-2004. AgBioForum 8, 187-196, (2005).
92 Powles, S. B. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. Pest Manag Sci 64, 360-365, (2008).
93 Canola Council of Canada. Disponible à la page Internet http://www.canolacouncil.org/markets-stats/statistics/estimated-acreage-and-percentage/
94 Powles, S. B. & Howat, P. D. Herbicide-Resistant Weeds in Australia. Weed Technol 4, 178-185, (1990).
95 Chu, C. C., Spencer, J. L., Curzi, M. J., Zavala, J. A. & Seufferheld, M. J. Gut bacteria facilitate adaptation to crop rotation in the western corn rootworm. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110, 11917-11922, (2013).
96 Bolin, P. C., Hutchison, W. D. & Andow, D. A. Long-term selection for resistance to *Bacillus thuringiensis* Cry1Ac endotoxin in a Minnesota population of European corn borer (Lepidoptera : Crambidae). J Econ Entomol 92, 1021-1030, (1999).
97 Tabashnik, B. E. & Carrière, Y. Successes and failures of trangenic Bt crops: global patterns of field-evolved resistance. Bt Resistance, Characterization and strategies for GM crops producing *Bacillus thuringiensis* toxins; Soberón M. *et al.* (Eds.), (2015).
98 Liu, Y. B., Tabashnik, B. E. & PusztaiCarey, M. Field-evolved resistance to *Bacillus thuringiensis* toxin CryIC in diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae). J Econ Entomol 89, 798-804, (1996).
99 Tabashnik, B. E., Brevault, T. & Carriere, Y. Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres. Nat Biotechnol 31, 510-521, (2013).
100 Tabashnik, B. E. *et al.* Suppressing resistance to Bt cotton with sterile insect releases. Nat Biotechnol 28, 1304-1307, (2010).
101 Tabashnik, B. E. *et al.* Sustained susceptibility of pink bollworm to Bt cotton in the United States. GM crops & food 3, 194-200, (2012).
102 Lu, Y., Wu, K., Jiang, Y., Guo, Y. & Desneux, N. Widespread adoption of Bt cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services. Nature 487, 362-365, (2012).
103 Marvier, M., McCreedy, C., Regetz, J. & Kareiva, P. A meta-analysis of effects of Bt cotton and maize on nontarget invertebrates. Science 316, 1475-1477, (2007).
104 Lu, Y. *et al.* Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China. Science 328, 1151-1154, (2010).
105 Lindroth, E. *et al.* Population Genetics of the Western Bean Cutworm (Lepidoptera: Noctuidae) Across the United States. Ann Entomol Soc Am 105, 685-692, (2012).
106 European Food Safety Authority. Guidance on the environmental risk assessment of genetically modified plants. EFSA Journal 8, (2010).

La raison d'être de VIB est la recherche fondamentale dans le domaine des sciences de la vie. Ces recherches visent d'une part à mieux comprendre l'influence des mécanismes moléculaires sur des organismes vivants, tels que les humains, les animaux, les plantes et les micro-organismes et d'autre part, à produire des résultats tangibles, qui contribuent à une meilleure société.

En s'appuyant sur une étroite collaboration avec les cinq universités flamandes (UGent, KU Leuven, Universiteit Antwerpen, Vrije Universiteit Brussel et UHasselt) ainsi que sur un programme d'investissement solide, VIB rassemble l'expertise de 1 470 collaborateurs originaires de 66 pays et répartis dans 75 groupes de recherche, au sein d'un seul institut.

Le transfert de technologie de VIB traduit les résultats de recherches en de nouvelles activités économiques, qui aboutissent à terme, à la production de nouveaux produits pouvant être utilisés dans le domaine de la médecine, de l'agriculture et d'autres applications.

VIB participe aussi activement au débat public sur la biotechnologie et développe et distribue une vaste gamme d'informations scientifiquement fondées sur tous les aspects de la biotechnologie.

Plus d'information: www.vib.be

VIB
Rijvisschestraat 120
9052 Gand
Belgique
Tel. +32 9 244 66 11
Fax +32 9 244 66 10
info@vib.be
www.vib.be

R.E. Jo Bury, Rijvisschestraat 120, 9052 Gent, België - D/2015/12/267/6