

**Les cultures transgéniques permettent-elles de réduire l'usage des produits phytosanitaires ?
Considérations à partir du cas du soja tolérant au glyphosate**

Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 11, Numéro 2, 85-91, MARS/AVRIL 2004, OGM

Auteur(s) : Sylvie BONNY¹, Christophe SAUSSE²

¹ INRA, UMR d'Economie Publique, INRA Grignon BP 01, 78850 Grignon, France

Tél. : 01 30 81 53 34

Fax : 01 30 81 53 68

<bonny@grignon.inra.fr>

² CETIOM, Direction Scientifique, Centre de Grignon, BP 4, 78850 Grignon

Tél. : 01 30 79 95 67

Fax : 01 30 79 95 90

<sausse@cetiom.fr>

Résumé : L'article s'interroge sur l'impact des cultures transgéniques sur l'emploi des pesticides, objet de nombreux débats. Sont examinés les résultats de plusieurs études portant sur le bilan des premières années d'utilisation à grande échelle des OGM aux États-Unis, plus particulièrement du soja tolérant au glyphosate. Les travaux analysés présentent des résultats variables, surtout pour les années récentes, selon les méthodes choisies et le type d'extrapolations faites. Divers facteurs expliquant l'accroissement de l'emploi global du glyphosate sont passés en revue. Mais l'estimation des quantités d'herbicides utilisées qui dépendent de nombreux facteurs n'est pas un indicateur valide de l'impact des cultures transgéniques sur l'environnement.

Summary : The paper examines the impact of transgenic crops on pesticide use, the subject of intense debate. The paper goes through the results of several studies dealing with the assessment of the first few years' use of GMOs on a large scale in the United States, more particularly of glyphosate tolerant soybeans. The results of these studies are variable, especially for recent years: they depend on the kinds of methods and extrapolations adopted by their authors. Various factors explaining the increased use of glyphosate are reviewed. However, the quantity of the herbicides used depends on many factors and is not an adequate indicator of the environmental impact of transgenic crops.

Mots-clés : OGM, culture transgénique, culture tolérante à un herbicide, pesticide (produit phytosanitaire), environnement, herbicide, soja, glyphosate

Keywords : GMO, transgenic crop, herbicide tolerant crop, pesticide, environment, herbicide, soybean, glyphosate

ARTICLE

Les transformations génétiques utilisées aujourd'hui en production végétale concernent principalement des tolérances aux herbicides et des résistances aux insectes. L'un des bénéfices avancés de ce type d'OGM est de contribuer à une amélioration du bilan environnemental des cultures, *via* une diminution du nombre de traitements phytosanitaires et/ou l'utilisation de molécules présentant un meilleur profil écotoxicologique. Mais cela est souvent contesté et d'aucuns avancent que les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide ou résistantes à des insectes entraînent au contraire une hausse de l'emploi des pesticides. Divers travaux ont été effectués sur ce sujet, en particulier à partir des observations conduites aux États-Unis où sont cultivées une grande part des plantes transgéniques actuelles. Finalement peut-on faire aujourd'hui un premier bilan en la matière ? Le cas du soja tolérant à un herbicide est étudié ici : il s'agit en effet de la culture transgénique la plus répandue pour l'instant dans le monde, et il peut illustrer plus largement l'exemple des espèces tolérantes à un herbicide. Par contre les cultures résistantes à des insectes ne sont pas abordées car les questions en jeu diffèrent : on ne traite plus contre les insectes cibles de la toxine Bt introduite dans la variété transgénique, mais seulement contre certains autres, d'où une réduction de l'emploi d'insecticides ; le débat concerne alors d'autres aspects : production de la toxine Bt dans la plante et son devenir, risque d'apparition d'insectes résistants, etc.

Données, méthodes et interprétations

Des plantes génétiquement modifiées sont cultivées à grande échelle depuis 1996, principalement sur le continent américain (*tableau 1*). Les États-Unis en ont les plus vastes superficies et une culture, le soja tolérant à un herbicide, y a connu un succès notable puisque 81 % des surfaces de soja étaient transgéniques en 2003, et que les prévisions pour 2004 sont de 86 % (*tableaux 2 et 3*). À l'échelle mondiale, plus de la moitié du soja cultivé est également transgénique. Cette innovation permet de simplifier le désherbage, en se passant des traitements de présemis – prélevée habituellement pratiqués pour ne traiter qu'en culture. Divers travaux ont présenté des premières analyses des avantages et inconvénients de ce type de culture et les facteurs expliquant son développement aux USA, et ne sont pas repris ici [1, 2]. La quasi-totalité de ces sojas sont tolérants au glyphosate et couramment dénommés sojas *Roundup Ready* (en abrégé par la suite soja RR), ou sojas HT (« tolérant à un herbicide »). Il existe cependant un autre type de soja tolérant à un herbicide, le *Synchrony*, obtenu par mutagenèse et non par transgenèse, dénommé STS® (*Sulfonylurea Tolerant Soybean*). Mais il n'est cultivé actuellement que sur de faibles surfaces, environ 2,3 % de celle totale de soja dans le monde en 2002 [3]. Toutefois en 1998 son importance relative aux USA était un peu plus forte, mais il s'est peu diffusé ensuite car le désherbage manquait d'efficacité.

Tableau 1. Répartition des cultures transgéniques dans le monde en 2002-2003 (Mha) [25].

Par pays					Par culture					Par caractère transgénique				
Pays	Mha 2002	Mha 2003	% 2002	% 2003	Culture	Mha 2002	Mha 2003	% 2002	% 2003	Caractère	Mha 2002	Mha 2003	% 2002	% 2003
États-	39,0	42,8	66	63	Soja	36,5	41,4	62	61	Tolérance	44,2	49,7	75	73

Unis										à un herbicide (HT)				
Argentine	13,5	13,9	23	21	Maïs	12,4	15,5	21	23	Résistance à des insectes (Bt)	10,1	12,2	17	19
Canada	3,5	4,4	6	6	Coton	6,8	7,2	12	11	Résistance à des insectes et tolérance à un herbicide	4,4	5,8	8	8
Brésil	–	3	–	4	Colza	3,0	3,6	5	5	Résistance à des virus ou autre	< 0,1	< 0,1	< 1	< 1
Chine	2,1	2,8	4	4										
Total	58,7	67,7	100	100	Total	58,7	67,7	100	100	Total	58,7	67,7	100	100

Tableau 2. Proportion et superficie des principales cultures transgéniques aux États-Unis (Source : USDA).

Proportion (%) de la surface de chaque culture en variétés transgéniques

Année	Soja HT	Maïs HT*	Coton HT**	Maïs Bt*	Coton Bt**
1998	44	9	26,2	19,1	16,8
1999	56	8	42,1	25,9	32,3
2000	54	7	46	19	35
2001	68	8	56	19	37
2002	75	11	58	24	35

2003	81	15	59	29	41
Année	Soja HT	Maïs (total)		Coton (total)	
2002	75	34		71	
2003	81	40		73	
2004 (prév)	86	46		76	

HT : tolérant à un herbicide ; Bt : variété résistante à certains insectes par la toxine Bt.

* Une petite part du maïs transgénique (4 % du total en 2003) a les deux caractères de résistance à des insectes par la toxine Bt et de tolérance à un herbicide. La surface totale dans les trois dernières lignes exclut les doubles comptes.

** Une part du coton transgénique (27 % de sa surface totale en 2003) est à la fois résistant à certains insectes et tolérant à un herbicide. La surface totale dans les trois dernières lignes exclut les doubles comptes.

Tableau 3. Surface des principales cultures transgéniques (Mha) aux États-Unis.

Année	Soja RR	Maïs	Coton
2002	22,4	10,9	4,0
2003	24,1	12,8	4,1

Quel est donc l'usage des herbicides pour le soja RR comparé au conventionnel et quelle a été son évolution ? Le soja RR permet-il ou non une économie de désherbants ? En préalable, il faut noter que réduire l'emploi des herbicides n'est pas en général l'élément décisionnel prépondérant sur tout autre des firmes, des agriculteurs, ni d'ailleurs de l'ensemble de la société. Si cet aspect est souvent mentionné dans les débats, il n'est pas pour autant l'objectif primordial qui surdéterminerait tous les autres : les acteurs tiennent compte de divers facteurs dans leurs choix en ce domaine. Par ailleurs, si évaluer l'évolution de l'usage des herbicides avec le soja RR paraît de prime abord une question simple, y répondre soulève en réalité de multiples difficultés méthodologiques. En premier lieu une notion ancienne souvent oubliée est à rappeler : il faut considérer l'exploitation comme un système et éviter d'étudier une production isolément. En particulier étudier une culture, et plus encore une seule technique culturale, indépendamment des autres productions ou techniques et du fonctionnement de l'ensemble de l'exploitation peut donner une vue erronée, car cela néglige les interactions avec tout le reste du système de production et divers coûts d'opportunité. Ceci s'applique dans le cas étudié : le soja RR qui requiert un peu moins de travail est intéressant pour les agriculteurs ayant de vastes surfaces et peu de main-d'œuvre ainsi que pour les

pluriactifs qui ont un travail à l'extérieur. Des travaux ont montré une liaison entre l'adoption de soja RR et le niveau de revenu extérieur [4]. Or la pluriactivité est assez fréquente aux USA : en 2002, 43 % des chefs d'exploitation avaient une activité principale autre qu'agricole, et 55 % avaient travaillé au moins plusieurs jours à l'extérieur (aux USA, le seuil de définition d'une exploitation est d'avoir au moins 1 000 dollars de produits agricoles vendus). Même dans l'Iowa, Etat fort agricole premier producteur de soja, en 2002, 32 % des chefs d'exploitation avaient une activité principale non agricole et 54 % avaient travaillé certains jours à l'extérieur.

Si l'on veut comparer l'emploi d'un intrant entre variétés transgéniques et variétés conventionnelles à partir de résultats recueillis par enquêtes dans les exploitations – et non seulement à partir de parcelles expérimentales – afin d'évaluer leur impact effectif, les écueils sont nombreux :

- biais éventuel même inintentionnel des sources d'information disponibles et/ou de la présentation des résultats tant ce sujet est l'objet de très vives controverses ;
- difficulté méthodologique pour comparer les consommations d'herbicides de deux mêmes cultures, l'une transgénique, l'autre non, même dans le cas où elles sont toutes deux présentes sur la même exploitation. En effet, les agriculteurs cherchent plutôt à utiliser des variétés transgéniques ou non selon leurs intérêts relatifs dans les diverses parcelles ou situations : ils peuvent ainsi choisir du soja RR pour les parcelles les plus infestées d'adventices. Il est donc difficile de séparer l'effet « OGM » d'autres effets agissant simultanément comme le contexte pédoclimatique des parcelles ou la disponibilité en temps de l'agriculteur, etc. ;
- multiples biais possibles si l'on compare cultures transgéniques et non transgéniques dans des exploitations différentes car de nombreux autres critères que le caractère OGM ou non interviennent sur la consommation d'herbicides. Ainsi le profil des adopteurs peut différer de celui des non-adopteurs, le type de soja choisi dépend de son adéquation au contexte, et les autres techniques culturales influent sur l'emploi des désherbants. Pour le soja aux USA comme pour la plupart des productions agricoles, il existe en effet une grande variabilité de conduites culturales et de résultats selon les conditions du milieu, du climat et les caractéristiques socio-économiques des exploitations. En matière d'emploi d'herbicides, pour le soja, influenceront ainsi les conditions pédoclimatiques, l'espacement des rangs, la date et la densité de semis, le choix d'un travail du sol simplifié ou non, le type de précédent, l'utilisation d'irrigation, le fait d'être parfois en culture dérobée après un blé, la disponibilité en temps, etc., sans négliger le niveau d'information ou de préoccupations environnementales des *farmers*, et bien sûr les prix. D'ailleurs le pourcentage de la surface de soja transgénique est resté assez hétérogène entre les Etats américains jusqu'à une date récente : dans les 14 premiers Etats producteurs de soja, la part des cultivars transgéniques y variait en 2000 de 22 % à 72 %, en 2001 de 49 % à 80 %, et en 2003 de 73 % à 91 % (prévisions pour 2004 : de 75 à 96 %).

Des perfectionnements dans les traitements statistiques permettent partiellement de séparer l'effet de certains facteurs et de tenter de comparer les quantités d'herbicides utilisées en soja RR et conventionnel « toutes choses égales par ailleurs » autant que possible. Mais les résultats obtenus apportent-ils des informations pertinentes ? La polémique en la matière suppose implicitement que réduire les quantités d'herbicides a toujours et partout un impact positif pour l'environnement, quels que puissent être les autres aspects concomitants. Ainsi, très fréquemment les quantités à l'hectare servent de base pour comparer, entre deux modes de culture ou régions, l'emploi des produits

phytosanitaires, et de manière implicite ou non, des impacts sur l'environnement. Or il n'existe pas de proportionnalité entre les deux termes. Les effets environnementaux d'un produit phytosanitaire ne se mesurent pas à la quantité utilisée par ha, d'autant plus que les doses préconisées varient fortement entre molécules. En pharmacologie humaine on ne compare pas divers médicaments d'après la quantité prise car 1 g de matière active a un effet bien différent selon les molécules : par exemple un adulte peut absorber jusqu'à 3 g/j de paracétamol ou d'aspirine, mais ne devra pas dépasser 300 mg de codéine ou 4 mg de colchicine. La dose employée doit toujours être mise en relation avec le produit, en particulier avec ses seuils d'action et de toxicité. Il en est de même pour de nombreux produits et notamment pour les pesticides. Les effets de ces derniers sur l'environnement dépendent aussi de la sensibilité des milieux et des modalités d'épandage. Connaître la quantité épandue d'un produit ne saurait donc suffire, il faut la croiser avec ses propriétés et la sensibilité des agroécosystèmes. Ces paramètres sont complexes à établir en raison des multiples effets et contextes à considérer, et de la pondération nécessaire *in fine* si l'on veut établir des indicateurs composites intégrant les divers types d'impacts toxicologiques et écotoxicologiques sur l'homme, les animaux, les divers organismes vivants et types de milieux. Pour les intrants agricoles, il faut également tenir compte d'autres facteurs comme le nombre d'épandages, le temps nécessaire, la facilité d'emploi et la flexibilité pour l'utilisateur. Il faut noter que si les *farmers* ont largement adopté le soja RR, cela est dû au fait que le désherbage par les méthodes classiques était assez difficile et rencontrait des limites dans les années 1995 [2]. Les travaux comparant le désherbage du soja RR et conventionnel en termes de quantités de matières actives utilisées ont l'inconvénient de ne pas tenir compte de ces facteurs alors que pourtant une approche multicritère est nécessaire.

Enfin, quand des modifications dans l'usage d'un intrant sont observées sur le terrain, il est souvent nécessaire d'analyser ses causes car elles peuvent être diverses et ne pas relever seulement ou principalement du facteur dont on cherche à évaluer l'impact (attention aux biais provenant du choix des variables que l'auteur juge déterminantes alors que d'autres peuvent peser lourdement !). L'usage relatif des pesticides dépend des autres techniques utilisées, du prix des produits phytosanitaires et de leur réglementation, des exigences des clients, des conditions d'achat des intrants, etc., qui peuvent varier entre les deux techniques considérées. Ainsi, par exemple, les techniques de conservation des sols (sans labour ou semis direct) se sont beaucoup développées aux USA, et elles s'associent bien avec les cultures transgéniques ; or par ailleurs elles entraînent une modification dans l'emploi des herbicides : des évolutions de ces derniers peuvent relever aussi de ce facteur.

Sources d'information disponibles et aperçu sur quelques analyses

Pour effectuer une comparaison entre soja RR et conventionnel, la première exigence est de connaître l'emploi d'herbicides sur chacun d'eux et son évolution. Or, il existe aux USA peu de données statistiques qui différencient l'usage des herbicides entre ces deux types de soja. Certes, chaque année l'enquête ARMS (*Agricultural Resource Management Survey*) de l'USDA (*United States Department of Agriculture*) fournit nombre d'informations sur les cultures et permet notamment de connaître les quantités des divers produits chimiques (engrais, pesticides) utilisés pour chacune d'elles. Mais pour une espèce donnée, elle ne différencie pas les intrants selon les divers types de culture. De la sorte pour le soja, on connaît seulement les divers herbicides utilisés chaque année, ainsi que leurs doses et le nombre de traitements, mais sans pouvoir différencier entre sojas

transgénique et conventionnel. Cela n'est possible que les années où a lieu une enquête plus détaillée comme en 1997-1998 et en 2002 pour le soja : l'enquête ARMS est en effet modulaire avec diverses phases et segments en interrelation dont certains varient d'une année à l'autre compte tenu des multiples cultures à étudier.

Les résultats des enquêtes de 1997-1998 pour le soja ont fait l'objet de travaux approfondis et de nombreuses publications de la part de l'USDA-ERS (service économique de l'USDA) pour analyser notamment l'impact de l'adoption du soja RR [5-10]. Dans leurs analyses, les économistes de l'USDA soulignent les aspects méthodologiques à considérer et la nécessité de séparer l'effet de divers facteurs simultanés – autres que l'adoption ou non de variétés transgéniques – qui influent sur l'emploi d'herbicides. Pour cela, ils comparent diverses méthodes d'estimation (*tableau 4*). Il apparaît qu'entre 1997 et 1998, la diffusion du soja RR entraîne une réduction du nombre de traitements sur les surfaces cultivées, mais les quantités de matières actives épandues augmentent quand on cherche à éliminer l'effet d'autres variables pesant sur les consommations. La comparaison en 1997 dans les diverses grandes régions de production fait apparaître que les surfaces semées en soja RR présentent par rapport à celles en soja conventionnel un nombre de traitements plus faible, un plus fort taux de semis direct, et un rendement généralement plus élevé, toutefois les variations entre régions sont notables, ainsi que d'ailleurs les taux d'adoption (*tableau 5*) [11].

Tableau 4. *Évolution de l'usage des herbicides avec l'adoption du soja HT (comparaison de leur emploi entre adopteurs et non adopteurs) [5, 10].*

Méthode de comparaison	Nb de traitements/ha × surface de soja en Mha	Quantité de matières actives (1 000 tonnes)
– Différence entre parcelles des adopteurs et non adopteurs en 1998	– 3,7	– 0,1
– Différence observée entre 1997 et 1998 ¹	– 4,0	– 3,017
– Différence 1997-1998 en éliminant l'effet d'autres facteurs ²	– 6,5	1,041

¹ La comparaison concerne l'évolution de la consommation d'herbicides entre 1997 et 1998 imputable à l'augmentation des surfaces en soja HT.

² Un modèle de régression est utilisé pour éliminer l'effet des facteurs autres que l'adoption des OGM pouvant affecter l'emploi d'herbicides (variations des prix, des pratiques culturales, des niveaux d'infestation, etc.).

Tableau 5. Comparaison des surfaces cultivées en soja RR et conventionnel en 1997 aux USA* [11].

Région	Corn Belt (Illinois, Indiana, Iowa, Missouri, Ohio)	Southeast (Caroline du Nord, Tennessee, Kentucky)	Delta (Arkansas, Louisiane, Mississippi)	Northern Plains (Dakota du Sud, Kansas, Nebraska)
Soja RR en % de la surface totale de soja	16,9	18,3	33,4	12,8
Nombre de traitements/ha en soja RR	1,86**	1,33**	1,75**	1,92**
en soja conventionnel	2,99	3,01	3,24	2,65
Rendement (q/ha) en soja RR	35**	26**	19	30**
en soja conventionnel	31	22	23	26
Semis direct (%) en soja RR	48	69**	31	62**
en soja conventionnel	30	40	18	17

* Les surfaces en soja conventionnel correspondent uniquement à des semences achetées, à l'exclusion des surfaces avec semences autoproduites (15 % des surfaces en 1997).

** Différence significative au seuil de 5 % avec le soja conventionnel.

Mais pour les années suivantes, les enquêtes annuelles de l'USDA fournissent des résultats pour l'ensemble du soja « indifférencié ». Par manque de données statistiques détaillées au niveau individuel sur de vastes échantillons permettant des analyses rigoureuses des liens entre adoption de soja RR et traitements herbicides, les travaux effectués sont bien plus approximatifs. Plusieurs études ont utilisé avec diverses méthodes les statistiques d'emploi des divers herbicides sur l'ensemble du soja. Les conclusions diffèrent selon les auteurs, ce qui ne saurait surprendre puisque les travaux font à un moment ou un autre des extrapolations ou des hypothèses différentes.

Le bilan que tire le NCFAP (*National Center for Food and Agricultural Policy*) sur une quarantaine d'espèces déjà cultivées ou en passe de l'être est largement positif [12]. Cependant, cet organisme est plutôt considéré comme ayant un certain biais « pro-OGM ». Il dispose toutefois de nombreuses données sur l'emploi des produits phytosanitaires et a publié des travaux très documentés sur les

cultures transgéniques [13, 14]. Dans sa publication de 2002 sur le soja, le NCFAP cherche à estimer les impacts d'un remplacement du soja RR par du conventionnel [12]. Pour cela, il simule le remplacement des désherbants employés en 2001 sur soja RR par les programmes de désherbage pour soja conventionnel que conseilleraient selon les régions des agronomes des services de développement des universités interrogées dans le cadre de l'étude. La substitution de soja conventionnel au soja RR se traduirait par un accroissement des quantités de matière active épandues de 0,64 kg/ha en moyenne. Pour les 31 Etats où la production de soja est significative, cela représenterait 13 000 tonnes, soit environ 60 % du tonnage total d'herbicides employé sur soja RR. Autrement dit, en 2001 l'abandon du soja RR pour du conventionnel aurait accru l'emploi d'herbicides, et renchérit de surcroît les coûts de production, même si l'on prend en compte le prix plus élevé des semences transgéniques.

Benbrook a publié récemment une étude faisant le bilan des 8 premières années d'utilisation des OGM aux USA en matière de pesticides [15]. Pour cet auteur – qui est un consultant en protection intégrée des plantes, ayant des vues très critiques envers les OGM et travaillant notamment pour des associations opposées aux OGM – les promesses des cultures transgéniques n'ont pas été tenues et une tendance se dessine en leur défaveur, causée principalement par le soja RR. Ce rapport de Benbrook est très souvent cité par les détracteurs des OGM comme preuve de leur échec, d'autant plus que l'auteur avait déjà publié précédemment d'autres travaux critiquant les OGM sur d'autres aspects. Benbrook est l'un des auteurs de référence de tous ceux qui s'opposent aux OGM, notamment en Europe. Aux USA, ses publications paraissent avoir moins de notoriété ou de retentissement, non pas parce que les vues critiques sur les OGM n'existent pas, mais parce que celles-ci sont peut-être plus diversifiées et moins absolues qu'en Europe et portent souvent sur divers points assez ciblés.

Benbrook fait une estimation par extrapolation de l'emploi d'herbicides en soja RR et conventionnel pour les années 1996 à 2002, complétée d'une projection pour 2003. D'après ses calculs, la quantité de matière active par hectare et par an aurait tendance à augmenter sur le soja RR alors que le *trend* serait plutôt opposé sur variétés conventionnelles (*figure 1*). Il souligne que l'accroissement des herbicides est important entre 2001 et 2002. Il faut cependant noter que l'enquête de l'USDA utilisée comprend des différences notables d'échantillonnage entre ces deux années : en 2001 elle a concerné les 8 principaux Etats producteurs (71 % des surfaces de soja), en 2002 les 20 principaux Etats (97 % des surfaces), ce qui entache d'une grande marge d'erreur les extrapolations à l'ensemble de la sole pour 2001. L'auteur multiplie l'écart de consommation d'herbicides – estimé par hectare entre les deux types de soja – par la surface totale de soja RR. Il en déduit que depuis 1998 le soja RR entraîne à l'échelon national un accroissement de la consommation d'herbicides : ainsi, en 2001, il estime à 8 000 tonnes le supplément d'herbicides dû au soja HT (soit 24 % de la quantité totale de désherbants épandus sur l'ensemble des surfaces en soja). Selon ses estimations, le soja RR est plus consommateur que le soja conventionnel..

Cependant, ces travaux comprennent de fait, diverses approximations et extrapolations qui peuvent entacher la validité des résultats. En particulier, les données statistiques disponibles sur le glyphosate (tout comme sur les autres herbicides) ne permettent pas de savoir sur quel type de culture il est épandu. Le glyphosate peut en effet avoir trois types d'utilisation :

- en culture sur variété HT,

- avant le semis sur variétés HT mais aussi sur variétés conventionnelles en cas de techniques de conservation du sol,

- en traitement très localisé en culture conventionnelle pour quelques adventices spécifiques. Aussi, est-il de fait difficile d'imputer la hausse des doses de glyphosate par hectare aux seules variétés transgéniques. Par ailleurs, les surfaces en cultivars transgéniques sont estimées avec une certaine marge d'erreur, ne serait-ce qu'à cause du soja STS qui a parfois été comptabilisé en même temps. Concernant l'évolution de l'utilisation d'herbicides sur soja conventionnel, Benbrook indique que les programmes de désherbage ont évolué depuis une dizaine d'années vers une réduction des doses, en particulier pour les imidazolinones et les sulfonyles utilisés en post levée [16]. Cependant, ces traitements viennent compléter ceux effectués en présemis – prélevés à des doses nettement plus fortes [17]. Enfin, outre diverses extrapolations, le calcul de cette différence entre les quantités épandues à l'hectare sur soja RR et conventionnel suppose que l'on considère les deux programmes de désherbage comme parfaitement substituables l'un à l'autre. Or, en fait, il est difficile de savoir comment aurait évolué le désherbage du soja dans l'ensemble des divers contextes en l'absence de la diffusion de soja RR, d'autant plus que, en 1995, les *farmers* rencontraient diverses difficultés pour désherber cette culture. Autrement dit, dans l'analyse de Benbrook comme dans celle du NCFAP, établir « ce que l'on ferait, ou aurait fait, en l'absence de soja HT » pose un problème méthodologique, dont la résolution induit des résultats pour le moins différents ! Dans le cadre court de cet article, nous ne pouvons pas passer en revue tous les travaux effectués sur les cultures transgéniques et leurs impacts. Aussi nous limitons-nous à ces quelques études fréquemment mentionnées qui illustrent diverses questions en jeu. Les statistiques et analyses disponibles permettent de tirer plusieurs conclusions en termes de comparaison des traitements que l'on peut résumer ainsi :

- en soja RR, on emploie du glyphosate et parfois un autre herbicide tandis que le soja classique reçoit plusieurs types d'herbicides ;

- en soja RR, le nombre de traitements est généralement faible (un ou deux en général, mais plus souvent deux aujourd'hui, semble-t-il) contre deux, trois, voire parfois quatre en soja conventionnel, les variations étant fortes selon les années et les milieux ;

- pour l'ensemble de la sole en soja, la dose appliquée par traitement varie fortement selon l'herbicide. En moyenne en 2002 elle était pour les produits les plus courants (en g/ha) : glyphosate : 829 ; imazéthapyr 56 ; pendiméthaline 1 054 ; trifluraline 1 031 ; chlorimuron-éthyl 22 ; sulfentrazone 146 (ces divers herbicides ne sont bien sûr pas appliqués simultanément sur la même parcelle : selon les cas, de une à quelques matières actives y sont utilisées). La fourchette de leur dose à l'hectare s'étend de 5 g à 1,26 kg.

La comparaison de la quantité épandue par hectare entre soja RR et conventionnel a ainsi très peu de sens comme elle dépend du nombre de traitements et de la dose de chacun d'eux, laquelle varie très fortement.

De nombreux facteurs en jeu

Les tendances présentées – souvent obtenues avec des estimations ou des extrapolations à divers moments des calculs – doivent être interprétées avec prudence. Indéniablement entre 1996 et 2002,

l'emploi du glyphosate a augmenté, en pourcentage des surfaces traitées, et dans une moindre mesure en nombre moyen de traitements et en dose de matière active par hectare, et donc de façon globale aux USA avec l'extension des cultures HT. Mais celui des autres herbicides a fortement décliné en pourcentage de surfaces traitées, comme ils ont été remplacés par du glyphosate. Cependant, les facteurs explicatifs de l'emploi des divers herbicides peuvent être multiples, et non liés seulement à l'adoption ou non des variétés transgéniques. Ainsi la hausse de la consommation de glyphosate peut être favorisée par sa baisse de prix (*tableau 6*). En effet, aux USA le brevet sur cette molécule a expiré en septembre 2000, plus tardivement qu'en Europe. De très nombreux génériques se sont développés et les vendeurs de glyphosate se font une très vive concurrence car ce désherbant est l'un des premiers vendus au monde alors que par ailleurs le marché des produits de protection des plantes a tendance à stagner. De plus, la firme Monsanto a eu intérêt jusqu'à une date récente à accroître son marché car, en attendant le développement des cultures transgéniques, le glyphosate était son premier poste de vente (cela n'est plus le cas aujourd'hui, les ventes de produits biotechnologiques étant devenues supérieures) et l'entreprise était fort endettée. Du fait de la concurrence entre vendeurs, certains contrats d'utilisation de la technologie HT de Monsanto prévoient même quelquefois une nouvelle livraison de produit en cas d'échec du premier traitement [2].

Tableau 6. Prix payé par les agriculteurs pour le glyphosate aux USA (\$ par kg de matière active).

1991	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
30,54	28,73	29,55	29,83	30,72	31,27	31,05	25,09	23,88	24,54	23,99	23,88

La concurrence entre vendeurs a aussi entraîné aux USA l'apparition d'une multitude de formulations et de dosages pour le glyphosate en association ou non à d'autres molécules. Cela peut être un facteur conduisant à une certaine augmentation des doses, ou bien à l'emploi d'autres herbicides en complément. L'usage généralisé du glyphosate sur le soja fait courir le risque que se développent des adventices résistantes. Bien que cette molécule soit commercialisée comme herbicide depuis 1974, pendant plus de 20 ans, il n'y a pas eu de développement d'adventices résistantes au glyphosate ; mais avec la forte croissance des épandages, quelques-unes commencent à apparaître et à poser parfois des problèmes dans certaines régions aux USA [18-22]. Cette question est fréquemment évoquée dans les milieux agronomiques universitaires américains, ainsi que d'ailleurs par certaines firmes concurrentes de Monsanto.

Enfin, dans divers travaux, les variables mesurées ou estimées concernent des quantités de matières actives épandues et des superficies traitées, qui ne sont pas des indicateurs valides de l'impact d'un herbicide ou plus généralement d'un pesticide sur l'environnement. Ainsi, une évaluation de huit indicateurs de risques utilisés en Europe a mis en évidence que celui « quantité de matière active » ne permet pas de classer les pratiques [23]. Une évaluation rigoureuse nécessite en effet la prise en compte de facteurs multiples : outre les quantités de pesticides employées et leur mode d'application, l'impact dépend de leur diffusion dans les compartiments sol, eaux superficielles et souterraines, air, de leur vitesse de dégradation et de leur toxicité pour chacune des espèces présentes dans l'environnement [24]. Certains travaux effectués sur le soja ont pris en compte des propriétés toxicologiques des molécules : si les propriétés du glyphosate sont bien connues car ce produit ancien beaucoup utilisé a fait l'objet de multiples investigations, ce n'est pas le cas de

l'ensemble des herbicides auxquels il peut se substituer généralement un peu moins connus. On estime que le glyphosate présente des caractéristiques toxicologiques et écotoxicologiques favorables, mais que son usage peut parfois être problématique dans des situations à risque de ruissellement [17].

Conclusion

Affirmer que « les OGM permettent de réduire les pesticides » ou au contraire « entraînent leur accroissement » n'a guère de signification en soi, surtout en matière de plantes tolérantes au glyphosate. Ne serait-ce que parce que ce n'est pas le poids appliqué par hectare qui compte, mais les effets de la molécule à telle ou telle dose, dans tel ou tel milieu, avec telle ou telle condition d'application et face à des situations et problèmes variés. Le débat porte sur des variables (quantités de matières actives) qui ne reflètent que d'une manière lointaine les divers effets des pratiques de désherbage sur l'environnement. Une évaluation plus précise de l'impact des pratiques nécessiterait des méthodes plus complexes en complément des enquêtes, comme l'utilisation de modèles ou d'indicateurs de risque. Autrement dit, évaluer l'impact des cultures transgéniques sur l'environnement par comparaison aux cultures conventionnelles ne peut se faire sur la base d'indicateurs trop frustes, mais suppose au préalable une réflexion sur les méthodes. En outre, il est nécessaire de disposer de statistiques détaillées permettant de différencier sur des échantillons représentatifs les traitements sur cultures transgénique et conventionnelle, ce qui est de fait peu fréquent. L'analyse détaillée de l'enquête soja de 2002 de l'USDA devrait apporter des informations intéressantes quand elle sera disponible. Enfin, si des modifications du niveau d'emploi des herbicides sont observées, il ne faut pas oublier qu'elles peuvent avoir diverses causes ! La polémique qui s'est développée autour du lien entre l'usage des OGM et la consommation de pesticides part de l'idée qu'une relation bijective peut exister entre ces deux variables. Dans le cas du soja HT, les études soulignent, à des degrés variés, les multiples déterminants de la consommation d'herbicides. Ces déterminants varient selon le temps, le lieu, et certains d'entre eux (l'apparition de résistances) sont engendrés par des rétroactions liées à l'usage même des herbicides. Quoi qu'il en soit, mais pour diverses raisons, l'usage du glyphosate augmente rapidement aux USA. Cette forte croissance peut poser problème, non pas parce que cette molécule serait dangereuse, mais plutôt pour la raison inverse. Comme le glyphosate est de plus en plus employé (en agriculture et hors agriculture), des adventices résistantes à ce désherbant risquent de se développer (il y en a déjà quelques-unes localement). Le glyphosate devrait alors être remplacé ou complété par d'autres herbicides assez souvent plus toxiques : on risque donc peut-être de perdre cette molécule si elle devenait inefficace, ce qui paraît dommageable car les désherbants de remplacement risquent d'avoir un profil relativement plus défavorable. Une question serait de savoir quels dispositifs de surveillance mettre en place, quelles variables mesurer pour comprendre la dynamique du système, et surtout quelles mesures incitatives ou réglementaires prendre pour favoriser l'adoption de techniques de contrôle intégrée des adventices.

De façon plus large à propos des OGM, il faut remarquer que l'analyse des variétés HT ne saurait être extrapolée à tous les OGM. Ce type de cultures transgéniques s'est développé en tout premier notamment à cause de leur plus grande facilité d'obtention et potentiel de rentabilité immédiate. Mais on ne saurait juger une nouvelle voie technologique sur la base de ses tous premiers produits mis sur le marché : du fait des avancées scientifiques et techniques, des réactions des utilisateurs, des stratégies des diverses entreprises et des réglementations, les innovations sont amenées à

évoluer de façon considérable. C'est là un facteur qui ne doit pas être oublié dans l'analyse des impacts des OGM actuels : ils ne préjugent pas des répercussions de l'ensemble des applications possibles du génie génétique.

RÉFÉRENCES

1. BONNY S. Le succès des cultures transgéniques aux États-Unis : facteurs agro-économiques et perspectives. *Economie Rurale* 2002 ; 267 : 91-105.
2. DUCORNEY F. *Le soja transgénique aux États Unis : facteurs de diffusion et impacts agro-économiques*. Grignon, INRA, UMR d'Économie Publique, 2003 ; 82 p. + ann.
3. MCDUGALL P. GM crop 2001 situation short term outlook. *Agro-Food-Industry High Tech* 2002 ; 13 (3).
4. FERNANDEZ-CORNEJO J, HENDRICKS C. *Off-Farm Work and the Economic Impact of Adopting Herbicide-Tolerant Crops*. Annual Meeting of the American Agricultural Economics Association, Montreal 2003.
5. HEIMLICH RE, FERNANDEZ-CORNEJO J, MCBRIDE W. Genetically Engineered Crops : Has Adoption Reduced Pesticide Use ? *Agricultural Outlook*, August 2000 : 13-7.
6. FERNANDEZ-CORNEJO J, MCBRIDE WD. *Genetically Engineered Crops for Pest Management in US Agriculture*. 2000 ; Report AER 786, Washington, USDA Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/AER786.
7. FERNANDEZ-CORNEJO J, MCBRIDE WD. *Adoption of Bioengineered Crops*. 2002 ; Report AER 810, Washington, USDA, Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/aer810/aer810.pdf.
8. FERNANDEZ-CORNEJO J, MCBRIDE WD. Genetically Engineered Crops- U.S. Adoption, Impacts *Agricultural Outlook*, Sept. 2002 : 24-77.
9. PRICE GK, LIN W, FALCK-ZEPEDA JB, FERNANDEZ-CORNEJO J. Size and Distribution of Market Benefits from Adopting Biotech Crops. *Technical Bulletin* 1906, Washington, USDA, 2003 ; Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/tb21906/tb1906.pdf.
10. FERNANDEZ-CORNEJO J *et al.*. Economic and Environmental Impacts of Herbicide Tolerant and Insect Resistant Crops in the United States. In : *The Economic and Environmental Impacts of Agbiotech. A Global Perspective*. N Kalaitzandonakes, ed. New York : Kluwer Academic/ Plenum Publishers, 2003 ; 63-88.
11. MCBRIDE WD, BOOKS N. Survey Evidence on Producer Use and Costs of Genetically Modified Seed. *Agribusiness* 2000 ; 16 (1) : 6-20.
12. GIANESSI LP, SILVERS CS, SANKULA S, CARPENTER JE. *Plant Biotechnology : Current and Potential Impact For Improving Pest Management In U.S. Agriculture : An Analysis of 40 Case Studies. Herbicide Tolerant Soybean*. 2002 ; Washington, NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), 32 p. www.ncfap.org/40CaseStudies.htm.

13. CARPENTER JE. *Case Studies in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology : Roundup Ready Soybeans and Bt Field Corn*. 2001 ; Washington, NCFAP, 57 p.
14. CARPENTER JE, GIANESSI LP. Case Study in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology : Roundup Ready Soybeans in : *Market Development for Genetically Modified Foods*, V Santianello, RE Evenson, D Zilberman ed. Wallingford : CABI Publishing, 2002 ; 227-43.
15. BENBROOK CM. *Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the United States : the first eight years*. BioTech InfoNet Technical Paper n° 6. Idaho, Northwest Science and Environmental Policy Center, 2003 ; 42 p.
16. BENBROOK CM. *Economic and Environmental Impacts of First Generation Genetically Modified Crops. Lessons from the United States*. Winnipeg, International Institute for Sustainable Development, 2002 ; 47 p.
17. HIN CJA, SCHENKELAARS P, PAK GA. *Agronomic and environmental impacts of the commercial cultivation of glyphosate tolerant soybean in the USA*. 2001 ; Culemborg (Pays-Bas), Centre for Agriculture and Environment (CLM). www.clm.nl/publicaties/html/496.html.
18. REDDY KN. Glyphosate-resistant soybean as a weed management tool : Opportunities and challenges. *Weed Biology and Management* 2001 ; 1°(4) : 193-202.
19. OWEN MD, ZELAYA IA. *Impact of herbicide resistant crops in North America - a Northern perspective*. 13th Australian Weeds Conference. Perth, Australia, September 8-13, 2002.
20. HAGER AG. *The Future of Weed Control In Soybean : How Many Options Will There Be ?* Urbana-Champaign UIUC, Univ. of Illinois 2003 Corn, Soybean Classic. www.cropsci.uiuc.edu/classic/2003.
21. HARTZLER R. Are Roundup Ready weeds in your future ? *GM Science Review, Forum* 28/02/03.
22. HEAP I. *International survey of herbicide resistant weeds*. 2004 ; Herbicide Resistance Action Committee (HRAC), North American Herbicide Resistance Action Committee, and Weed Science Society of America. www.weedscience.org.
23. REUS J *et al.*. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2002 ; 90 (2) : 177-87.
24. VAN DER WERF HMG. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agriculture Ecosystems and Environment* 1996 ; 60 (2-3) : 81-96.
25. JAMES C. *Preview : Global Status of Commercialized Transgenic Crops : 2003*. ISAAA Briefs (30). Ithaca, NY, ISAAA.

Illustrations

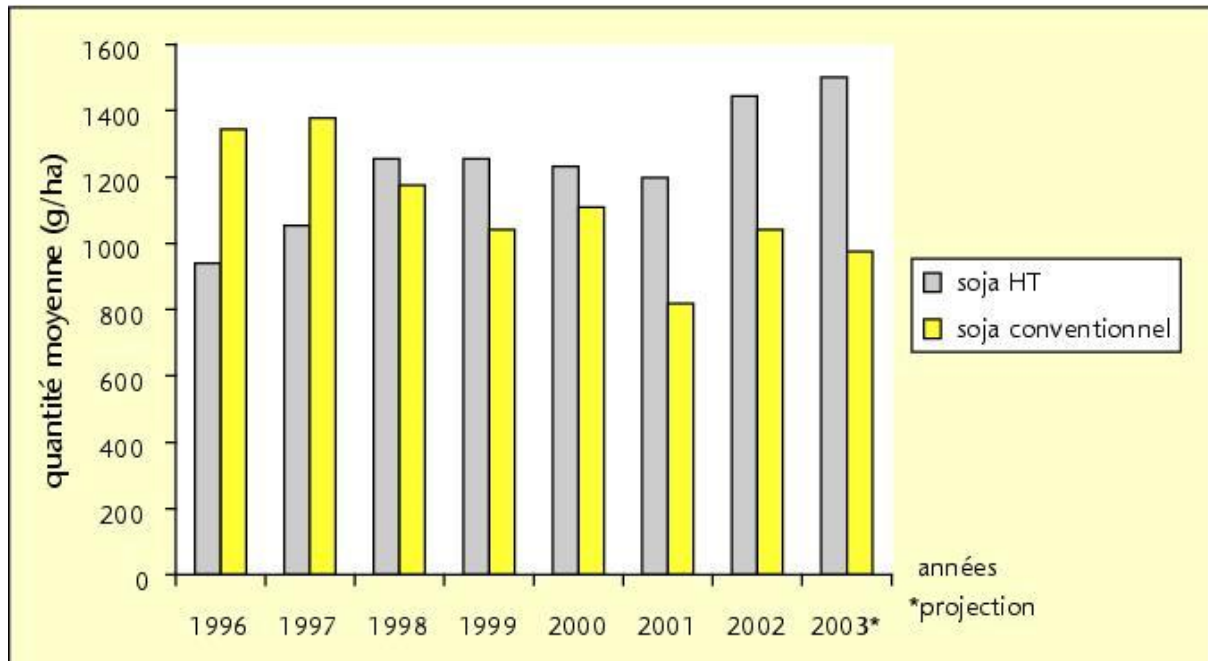


Figure 1. Évolution des quantités d'herbicides (matières actives) épandues par hectare de 1996 à 2003 (projection) d'après les évaluations de Benbrook [15].