



HAL
open science

Les cultures tolérantes à certains herbicides : adoption, impacts et développement d'adventices résistantes

Sylvie Bonny

► **To cite this version:**

Sylvie Bonny. Les cultures tolérantes à certains herbicides : adoption, impacts et développement d'adventices résistantes. *Biotechnologies végétales : Environnement, alimentation, santé*, Vuibert, 272 p., 2011, 978-2-311-00360-4. hal-01172990

HAL Id: hal-01172990

<https://hal.science/hal-01172990>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les cultures tolérantes à certains herbicides : adoption, impacts et développement d'adventices résistantes

Contribution à l'ouvrage

"Biotechnologies végétales : Environnement, alimentation, santé"

Agnès Ricroch, Yvette Dattée et Marc Fellous Eds, Edition Vuibert, 2011, pp. 138-151.

Sylvie BONNY, bonny@grignon.inra.fr

Sigles et abréviations

EIQ : Quotient d'Impact Environnemental	USDA : US Department of Agriculture
GM : génétiquement modifié	USDA NASS : USDA, National Agricultural Statistics Service
PGM : plantes génétiquement modifiées	USDA ERS : USDA, Economic Research Service
TCS : techniques de conservation des sols	VTH : variétés tolérantes à un herbicide
TH : tolérant à un herbicide	

L'emploi d'herbicides pour le désherbage des cultures s'est surtout répandu après les années 1950 et a facilité cette tâche qui naguère exigeait un labeur long et pénible. Il repose sur l'identification d'herbicides dits sélectifs parce qu'ils détruisent certaines adventices sans affecter la culture (cf. la tolérance à l'atrazine chez le maïs, ou celle aux sulfonylurées chez le blé). Le plus souvent cette résistance spontanée résulte de l'inactivation/dégradation de l'herbicide par la plante. Les doses d'herbicide épandues doivent être judicieusement calculées pour n'affecter que les adventices, ce qui se révèle délicat quand une adventice est de la même famille botanique que la plante cultivée. Cette difficulté est l'un des facteurs qui a conduit à rechercher des techniques nouvelles de désherbage basées sur un désherbant non sélectif tel que le glyphosate et une plante le tolérant. Depuis l'introduction des cultures transgéniques en plein champ en 1996, celles tolérantes aux herbicides (TH) sont prédominantes dans le monde (tableau 1) : elles représentaient 83% des cultures GM en 2010 (soit environ 122 millions d'ha) si l'on inclut celles ayant un ou deux autres caractères transgéniques (James, 2010). Leur utilité a été souvent controversée, notamment en Europe. Elles permettent en fait une nouvelle méthode de désherbage : en traitant une culture tolérante à un herbicide par celui-ci, toutes les adventices sont détruites pour une durée de quelques semaines, ce qui facilite le désherbage dans nombre de situations. Les principales espèces tolérantes à un herbicide sont notamment le soja, le maïs, le coton, le colza, la betterave sucrière, principalement implantés en Amérique du nord et du sud. La part de leur production en transgénique varie selon les cultures et les pays ; elle est particulièrement élevée pour le soja dont 81% des surfaces mondiales étaient transgéniques en 2010. En effet en 2010 le soja tolérant au glyphosate représentait 99% des surfaces de cette culture en Argentine, 93 % aux Etats-Unis et environ 75% au Brésil. L'herbicide auquel les PGM ont été le plus souvent rendues tolérantes est le glyphosate (commercialisé sous le nom de "Roundup"), plus rarement le glufosinate. Notons qu'il existe des variétés non transgéniques tolérantes à un herbicide, mais leur diffusion a été jusqu'à présent assez limitée.

Les cultures tolérantes à un herbicide étant sujettes à débat, ce chapitre va aborder successivement leurs facteurs de développement et leurs impacts agro-économiques (1), les effets de leur expansion sur l'emploi des désherbants (2), leurs perspectives compte tenu de l'apparition d'adventices résistantes au glyphosate (3). Diverses illustrations chiffrées prendront le cas du soja aux Etats-Unis car il est caractéristique.

L'expansion de ce type de cultures tolérantes à un herbicide a paru étonnant à beaucoup : en effet les uns escomptaient souvent que les biotechnologies permettraient une agriculture nécessitant moins de produits chimiques et valorisant davantage les processus du vivant, les autres estiment que, en dehors des firmes les commercialisant, ce type de caractère a fort peu d'intérêt pour la société et même pour les agriculteurs. Comment expliquer alors le développement de ces toutes premières PGM ? Plusieurs facteurs entrent en jeu. D'une part la tolérance à un herbicide est un caractère monogénique relativement facile à isoler et à introduire par transgénèse comparativement à d'autres caractères impliquant de nombreux gènes. Il fut présent dès les premiers essais au champ à la fin des années 1980. Par ailleurs, via la vente de l'herbicide, le plus souvent du glyphosate, il assurait aux firmes comme Monsanto un revenu pendant que la firme développait ses recherches en biotechnologies et génomique. En effet, Monsanto a transformé sa structure passant d'une entreprise purement chimique à une firme de biotechnologie et de semences, ce qui nécessitait des recherches et des investissements dont la rentabilité ne peut apparaître qu'au bout d'un temps assez long. Les ventes de glyphosate étaient essentielles tant que l'autre secteur (semences et génomique) était encore au stade de la recherche-développement. Enfin, ces cultures tolérantes à un herbicide ont été largement adoptées par les agriculteurs car elles permettaient notamment une simplification du désherbage et une réduction du temps de travail pour cette opération, en particulier pour certaines cultures comme le soja. Par ailleurs, cette nouvelle façon de désherber s'associait bien à d'autres techniques en progression, comme les techniques de conservation des sols (TCS) où il y a maintien d'une couverture du sol et non-labour ou labour réduit. Enfin les OGM ont bénéficié aux Etats-Unis, en Argentine, au Brésil d'un contexte favorable à leur développement. Dans ces pays beaucoup d'organismes ont apporté leur soutien aux biotechnologies agricoles et la perception des OGM a été assez bonne.

Tableau 1. Répartition des surfaces en cultures transgéniques dans le monde en 2010 selon les pays, les plantes concernées et leur type (en Millions d'hectares) (d'après James, 2010).

Selon le pays	Surface	%	Selon la culture	Surface	%	Selon le caractère GM	Surface	%	
Etats-Unis	66.8	45	Soja	73.3	52	Tolérance à un herbicide	89.3	61	
Brésil	25.4	17	Mais	46.0	31		} 83%	32.3	22
Argentine	22.9	16	Coton	21.0	12			Tolérance à herbicide & résistance à insectes	
Inde	9.4	6	Colza	7.0	5	Résistance à des insectes	26.3	16	
Canada	8.8	6	Betterave sucrière	0.5	<1				
Chine	3.5	2	Luzerne	0.1	<1	Résistance à des virus ou autres	<0.1	<1	
Paraguay	2.6	2	Autres (courge, papaye)	<0.2	<1				
Pakistan	2.4	2							
TOTAL	148	100	TOTAL	148	100	TOTAL	148	100	

1. Facteurs d'adoption et impacts agro-économiques

Pour les agriculteurs, par comparaison aux conventionnelles, chaque culture transgénique présente des avantages et inconvénients (tableau 2). Ils adoptent les variétés transgéniques selon le bilan attendu, ou qu'ils en tirent après une ou plusieurs années de culture. Mais au niveau agro-économique, évaluer l'intérêt d'une nouvelle technique est plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord en raison de la diversité des situations des exploitations et des fluctuations interannuelles ou inter-pays de prix qui peuvent induire des différences assez fortes selon le contexte ou l'année.

Tableau 2. Principaux avantages et inconvénients des cultures tolérantes au glyphosate pour les agriculteurs

Avantages	Inconvénients
<p>1. Agro-économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - gestion du désherbage souvent plus facile (un seul produit) - plus grande flexibilité du travail (on peut traiter pendant une période un peu plus longue), ce qui facilite les autres tâches. - moindre risque économique de désherbage raté. - rotation des cultures plus facile : le glyphosate non rémanent ne nuit pas à la culture suivante contrairement à d'autres herbicides. - diminution assez fréquente du nombre de traitements herbicides. - marge assez voisine ou un peu plus élevée que celle en conventionnel, le coût des traitements herbicides étant réduit. - réduction du temps de travail et d'utilisation du matériel pour les traitements en général. - bonne association avec les TCS (techniques de conservation des sols). <p>2. Environnementaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - le glyphosate remplace d'autres herbicides souvent plus toxiques, d'où une certaine réduction des risques par comparaison à la culture conventionnelle. - légère diminution du nombre de passages de tracteurs ou épandeurs. - souvent associé aux TCS qui réduisent l'érosion du sol et ont un bon impact environnemental. 	<p>1. Agro-économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - surcoût de la semence en raison des "technology fees". - il est souvent nécessaire de vérifier si des cultures certifiées non GM sont implantées dans le voisinage. - signature d'un contrat stipulant de ne pas réutiliser une part de la récolte comme semence. - plus grande attention requise dans la fabrication des semences afin d'éviter la présence accidentelle de graines GM dans un sac de semences certifié non GM. - risque de difficultés à maîtriser les repousses de la culture précédente si elle était tolérante au même herbicide. - forte concentration des entreprises d'agro biotechnologie. - suspicion accrue de certains envers les produits agricoles, d'où parfois des difficultés pour vendre ou exporter sur certains marchés. <p>2. Environnementaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - risques liés aux surfactants, adjuvants et métabolites de dégradation du glyphosate qu'il faudrait mieux connaître. - l'emploi important du glyphosate a induit l'apparition d'adventices résistantes à ce dernier. D'où utilisation d'autres herbicides souvent plus toxiques.

Les cultures tolérantes à un herbicide sont susceptibles d'être adoptées si elles permettent une meilleure marge que les conventionnelles, c'est à dire si le surcoût spécifique des semences transgéniques est plus que compensé par divers facteurs :

- usage d'une moindre quantité de désherbants et diminution du nombre de traitements induisant une économie de charges en la matière,

- moindres dépenses en herbicides dues à l'emploi de produits moins coûteux,
- meilleur rendement dû à un meilleur contrôle des adventices,
- plus fort taux d'adoption des techniques de conservation des sols (TCS), facilitées par les cultures tolérantes à un herbicide et induisant une réduction des coûts,
- diminution du temps de travail, plus grande flexibilité et facilité de celui-ci, ce qui permet d'alléger les coûts de traitement et de tirer parti de diverses opportunités (activités à l'extérieur, famille, etc.).

Il faut noter que, soucieuses d'écouler leurs nouvelles semences, les firmes établissent leurs prix à un niveau tel qu'elles soient intéressantes pour les agriculteurs. D'autres aspects entrent aussi en compte : possibilité ou non de vendre la récolte avec une prime de qualité "non-OGM" et montant des frais supplémentaires de ségrégation dans ce cas; coûts de la coexistence avec les productions voisines de même espèce, etc. En tout cas pour certaines cultures la facilitation du travail et le gain de temps ont entraîné une très large adoption et ont été appréciables comme en témoignent le soutien des associations de producteurs et nombre de publications (Alexander, 2006; Barnes, 2000; Carpenter, 2010; Carpenter, Gianessi, 1999; Fernandez-Cornejo, McBride, 2002; Gianessi, 2008; Marra, Piggott, Carlson, 2004; Qaim, 2009).

Toutefois avantages et inconvénients ne sont pas statiques, mais évoluent au cours du temps, en particulier avec les modifications parfois importantes des rapports de prix. Ainsi pour le soja aux Etats-Unis, depuis 1995 on a observé un renchérissement des semences, mais une baisse des prix des herbicides de 1998 à 2005 (fig. 1). En effet la diffusion des variétés tolérantes à un herbicide ayant entraîné le remplacement par le glyphosate d'une partie des désherbants de naguère, les firmes agrochimiques qui les produisaient ont diminué leurs prix entre 1997 et 2005 afin de chercher à limiter leurs pertes de marché. D'où dans un premier temps une réduction globale des coûts des traitements herbicides pour tous les producteurs de soja qu'ils utilisent des variétés transgéniques ou non (Bullock, Nitsi, 2001). Mais après 2005-2007, le coût total des pesticides utilisés par ha augmente et le prix du glyphosate –en baisse depuis 1998 comme son brevet avait expiré en 2000 aux Etats-Unis– connaît de fortes fluctuations. Celles-ci sont notamment liées à une production mondiale de génériques insuffisante à une période, puis excédentaire, notamment en raison de fortes exportations chinoises. Quant aux semences, elles ont vu leur prix augmenter en moyenne depuis 1996, notamment après 2000. Ce renchérissement concerne non seulement les transgéniques, mais aussi les conventionnelles. De la sorte dans les coûts de production du soja, le poste semences s'est accru tandis que celui des herbicides diminuait de 1998 à 2008 (Fig. 2). Globalement de 1997 à 2010, la part de ce poste "semences + herbicides" a augmenté par comparaison à la période 1980-1997. Mais les variations sont fortes selon les espèces et les pays, d'où la nécessité d'une analyse au cas par cas.

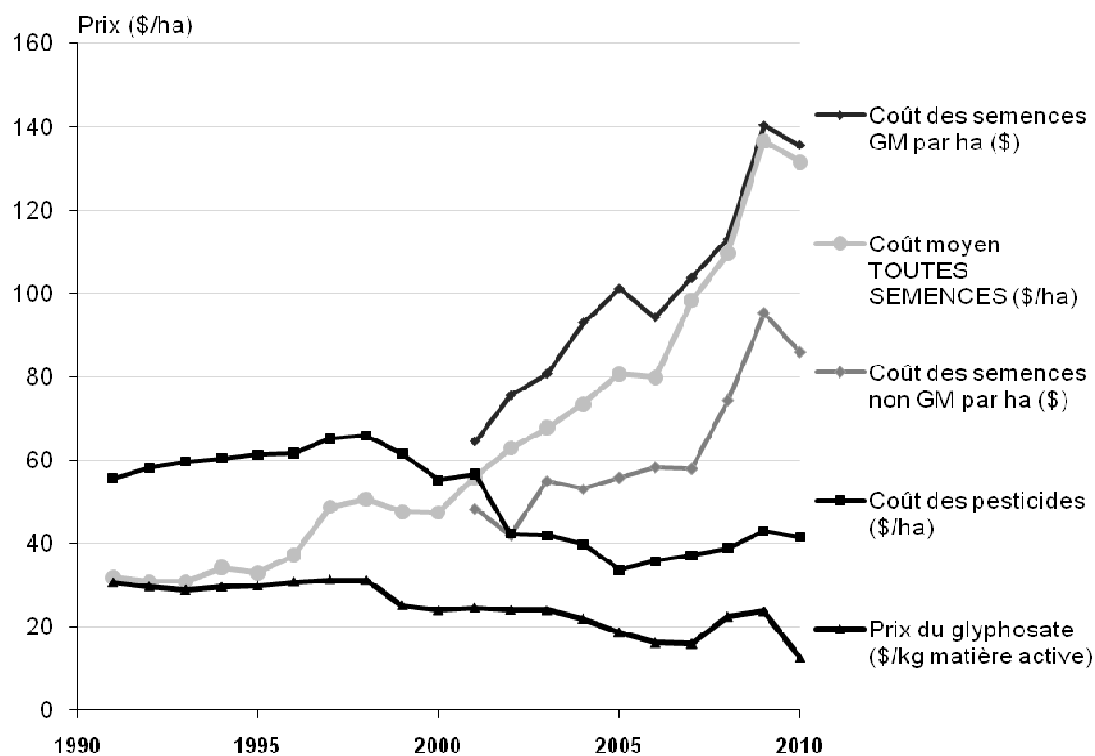


Fig. 1. Evolution des coûts des semences et pesticides et du prix du glyphosate pour le soja aux Etats-Unis de 1992 à 2010. NB Les coûts des semences GM et non-GM sont calculés pour une dose moyenne de semence chaque année, les quantités semées s'étant un peu modifiées au fil du temps (établi par l'auteur à partir des statistiques de l'USDA (USDA ERS, 2010a; USDA NASS, 1992 à 2010)).

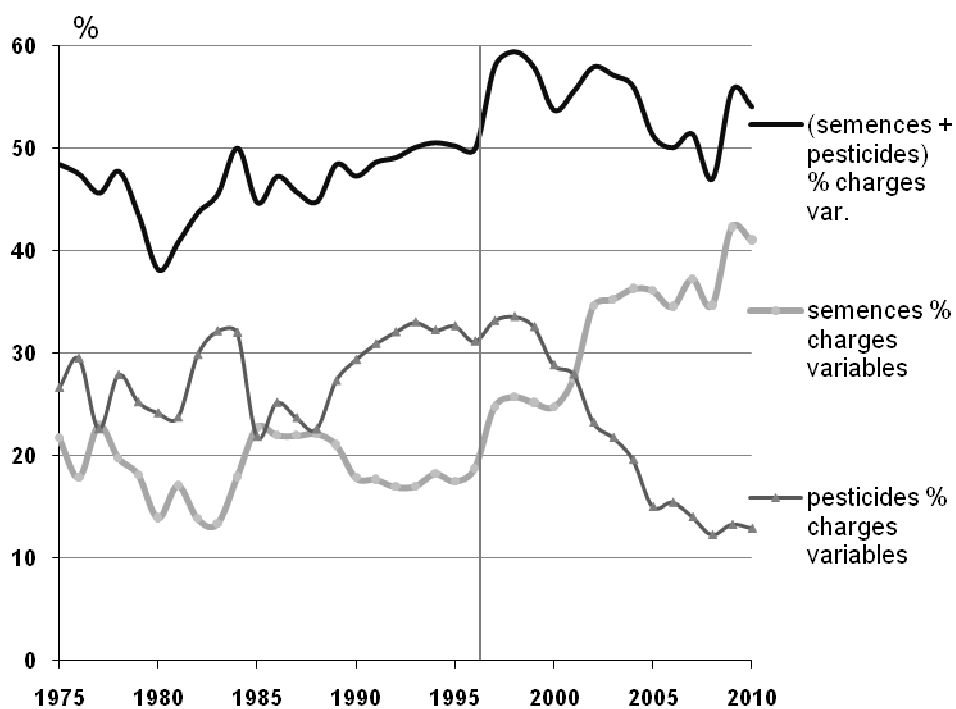


Fig. 2. Part des semences et pesticides dans les coûts de production du soja aux Etats-Unis de 1975 à 2010 (à partir de 1996 une part croissante du soja est transgénique) (établi par l'auteur à partir des statistiques de l'USDA ERS (2010a)).

En définitive, l'intérêt économique des cultures TH varie selon l'espèce, le milieu, le pays, les rapports de prix, la période, d'autant plus qu'il dépend de la valorisation du gain de temps permis, laquelle est liée au contexte et aux choix des agriculteurs. En tout cas le fort taux d'adoption des cultures tolérantes à un herbicide là où elles sont autorisées montre que pour un certain nombre de productions (soja, betteraves à sucre notamment) leur intérêt est appréciable pour les agriculteurs ; pour d'autres cultures tel le maïs, il est un peu moindre, d'où un taux d'adoption un peu plus modéré. Ainsi aux Etats-Unis les diverses cultures tolérantes à un herbicide ont été adoptées à des vitesses et proportions variables (USDA ERS 2010b).

2. Impacts de l'expansion des cultures tolérantes à un herbicide sur l'emploi de désherbants et l'environnement.

La question des quantités de pesticides utilisés étant devenue un sujet de préoccupation, quelle a été leur évolution avec les cultures tolérantes à un herbicide ?

2.1. Les questions de sources et de méthodes d'évaluation

L'évolution de l'emploi des pesticides avec les PGM est à voir au cas par cas car elle varie selon le type de caractère transgénique introduit, l'espèce et le contexte. Avec une culture tolérante au glyphosate, les désherbants conventionnels usuels sont supprimés en grande partie et remplacés par du glyphosate. Mais les désherbants sont employés à des doses fort variables par ha, les préconisations pouvant varier de 10 g/ha à 1,3 kg/ha selon la molécule (0,75 kg/ha pour le glyphosate). Les quantités utilisées ont ainsi peu de sens. Si l'on veut pouvoir apprécier leurs impacts environnementaux et toxicologiques, il est nécessaire dans la mesure du possible de pondérer la dose d'herbicides épanchée par des indicateurs de toxicité et d'écotoxicité et par la prise en compte de leurs conditions d'utilisation.

Par ailleurs il s'avère souvent difficile de comparer la quantité d'herbicides employés sur les cultures tolérantes au glyphosate et les conventionnelles, en raison de plusieurs facteurs :

- les variétés transgéniques peuvent être cultivées sur les parcelles les plus enherbées ou par les agriculteurs les plus innovants : la comparaison ne sera donc pas "toutes choses égales par ailleurs", d'autres éléments que le type de variété pouvant être à l'origine des effets relevés.
- la variabilité entre exploitations ou entre parcelles est notable (Foreman, Livezey, 2002) et peut dépasser celle entre les deux types de cultures.
- les évolutions sont souvent insuffisamment prises en compte alors que cette dimension est essentielle. En effet, quand on compare deux cultures ou deux pratiques culturales, il faut tenir compte de ce que toutes deux évoluent selon les modifications de prix, l'apparition de nouveaux phénomènes, la diffusion d'innovations complémentaires ou de substitution, etc.
- enfin et surtout il existe très peu de données statistiques accessibles comparant l'usage des herbicides entre variétés TH et conventionnelles sur de vastes échantillons représentatifs, a fortiori sur une durée longue, car ce type d'investigation est lourd et coûteux si on l'effectue sur des échantillons représentatifs suffisamment importants (il faut relever pour chaque

culture les quantités de tous les pesticides utilisés). En particulier aux Etats-Unis, si l'USDA a effectué pendant longtemps des enquêtes auprès des agriculteurs sur les divers produits chimiques employés par culture, les résultats sont fournis pour leur sole dans son ensemble et non en séparant variétés transgéniques et conventionnelles. Les données comparant les deux types de variétés n'existent que pour une année très proche du début de commercialisation 1997-98 (Fernandez-Cornejo, McBride, 2000, 2002; McBride, Brooks, 2000). Les évolutions de l'emploi des divers types de désherbants ne peuvent donc être analysées que de façon globale par culture sans différencier variétés TH et conventionnelles. De plus cette enquête a été extrêmement réduite pour raisons budgétaires à partir de 2007, d'où la quasi impossibilité d'analyser les évolutions après 2006. Les autres sources – des enquêtes faites par des cabinets d'études – sont d'un accès fort coûteux et sont confidentielles ou non diffusables.

2.2. Quelle évolution de l'emploi des désherbants avec l'expansion des cultures tolérantes au glyphosate ?

Avec celles-ci le glyphosate se substitue en grande partie aux herbicides précédemment utilisés. Cela permet, au moins pendant un certain nombre d'années, de diminuer le nombre de traitements et les quantités utilisées, et de réduire l'emploi de divers désherbants à profil toxicologique peu favorable. Ainsi l'usage du glyphosate augmente et celui des autres herbicides décroît nettement (Bonny, 2008a; Ervin et al., 2010). Qu'en est-il de la quantité totale d'herbicides épandus, glyphosate inclus ? Cela dépend de la culture, du contexte agropédoclimatique et économique et de la date d'investigation. Prenons le cas du soja aux Etats-Unis : la quantité totale d'herbicides épandus sur l'ensemble de sa sole a baissé dans un premier temps de 1996 à 2001, mais elle semble connaître ensuite une hausse notamment en 2002 et 2006 (Benbrook, 2009). De la sorte globalement, sur une surface donnée de soja, le niveau d'emploi total des herbicides de 1996 paraît à nouveau atteint en 2005 et dépassé en 2006, date de la dernière enquête disponible pour le soja (Fig. 3).

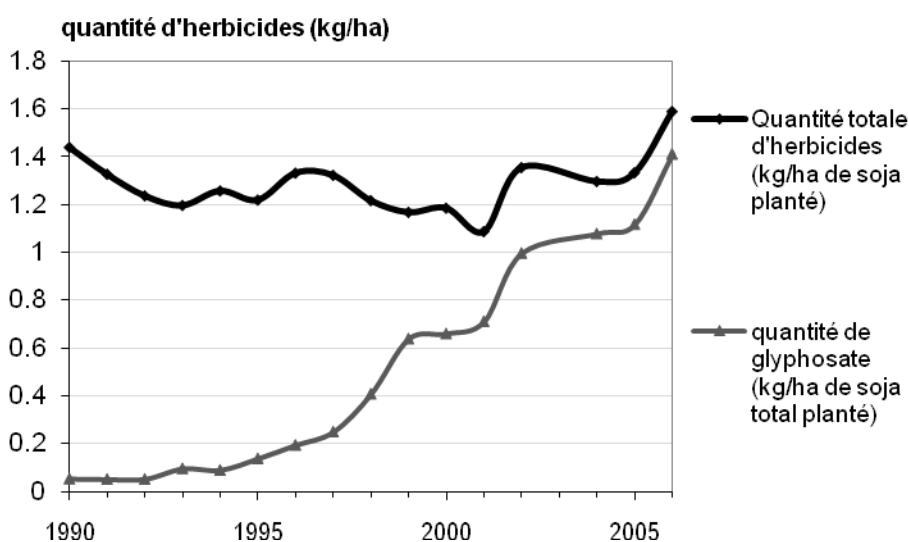


Figure 3. Evolution des quantités d'herbicides, en particulier de glyphosate, sur la sole de soja, 1990 – 2006, d'après les enquêtes USDA NASS (1991 à 2007).

Cependant, on ne peut pas déduire hâtivement de ces observations que, comparé au conventionnel, le soja TH nécessite un peu moins d'herbicides dans les premières années, mais ensuite davantage, car d'autres facteurs influent sur ces quantités. Ce sont notamment le développement des techniques de conservation des sols (TCS, telles le non labour, etc.) et la baisse de prix des herbicides à certaines périodes comme on le verra.

2.3. Incidences environnementales du changement des herbicides utilisés

La seule quantité de désherbants étant un indicateur insuffisant de leurs effets, il est souhaitable de la pondérer par des indicateurs rendant compte de leurs impacts environnementaux et toxicologiques. Mais il existe en la matière nombre de paramètres et de variables. Pour pouvoir faire des évaluations globales, on a souvent recours à des indicateurs composites élaborés par combinaisons d'indicateurs de base pour chaque pesticide : ils agrègent les données sur la toxicité et l'écotoxicité envers les divers organismes et milieux (Devillers et al., 2005). Différents indicateurs synthétiques ont été élaborés. Parmi eux, nous avons utilisé l'EIQ, Environmental Impact Quotient, mis au point par Kovach (1992, avec mises à jour). En effet, par la combinaison de nombreuses données sur chacun, il prend simultanément en compte trois aspects importants des pesticides : les effets sur les travailleurs, les effets sur les consommateurs et l'eau, et ceux sur l'environnement. En faisant la somme des quantités de tous les herbicides utilisés sur une culture pondérées par leur EIQ, on obtient un indicateur d'impact environnemental et sanitaire de ceux-ci. On peut alors comparer leurs effets potentiels selon les cultures ou selon différents modes de conduite. Vu son mode de calcul, plus l'EIQ au champ est élevé, plus les herbicides épandus sur la culture ont un fort impact sur l'environnement et la santé.

Nous avons donc recherché l'EIQ de chacun des désherbants du soja, puis nous avons établi l'EIQ au champ pour l'ensemble des herbicides épandus chaque année en multipliant la quantité de chacun par ha par son EIQ, puis en sommant les valeurs. L'EIQ au champ de tous les herbicides épandus sur le soja est ainsi évalué chaque année. Il apparaît que le quotient d'impact environnemental sur l'ensemble du soja s'améliore (il diminue) de 1996 à 2001, mais ensuite il remonte légèrement les années suivantes. La toxicité des herbicides utilisés considérés dans leur ensemble s'est donc atténuée dans un premier temps avec l'adoption des cultures GM. Mais à partir de 2001 une certaine détérioration apparaît : l'EIQ connaît une légère progression, mais reste encore inférieur à ce qu'il était en 1996 (fig. 4).

Ce type d'évaluation globale des effets des herbicides épandus n'est pas aisé car les impacts de certaines molécules ou de leurs composés de dégradation font l'objet de débats. En outre les adjuvants et surfactants associés aux matières actives ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'EIQ, d'où une minoration des effets de certains herbicides (Surgan, Condon, Cox, 2010). Aussi certains comme le Roundup font-ils l'objet de vives controverses. Enfin, comme ce type de calcul nécessite de connaître les doses précises de tous les désherbants épandus sur une culture, leur évolution et le différentiel entre production conventionnelle et transgénique, il est difficile à effectuer par manque de données fiables accessibles provenant d'enquêtes sur des échantillons représentatifs. Les évaluations à dire d'experts sont fréquemment utilisées

pour pallier cela, mais elles risquent souvent d'être assez approximatives et biaisées, aussi ne les avons-nous pas utilisées.

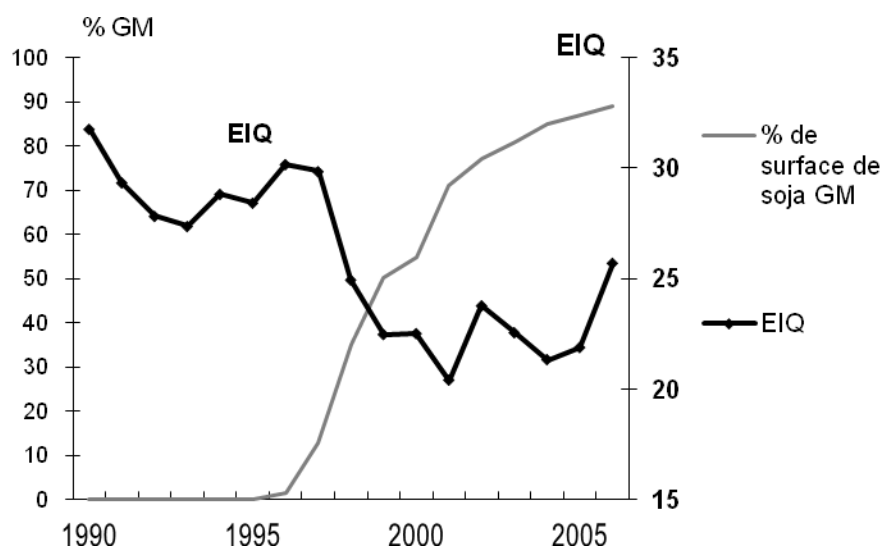


Figure 4. Evolution du quotient d'impact environnemental (EIQ) du soja de 1990 à 2006 (calculs de l'auteur).

Enfin, l'impact de l'expansion des cultures tolérantes à un herbicide sur l'emploi de désherbants et l'environnement paraît partagé : dans un premier temps pour certaines cultures il y a eu souvent une amélioration des effets environnementaux dus à une réduction des quantités de désherbants et/ou à l'épandage de produits à meilleur profil écotoxicologique que ceux utilisés auparavant ; mais l'emploi des désherbants semble ensuite avoir réaugmenté dans des proportions variables (Bonny, 2008b). C'est ce que conclut le récent travail de synthèse effectué par National Academy of Sciences en 2010 *"Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States"* :

"Il est important de reconnaître que, selon les paramètres utilisés, la substitution du glyphosate aux autres herbicides a entraîné une réduction de leur emploi par les producteurs de cultures TH. Mais le glyphosate est souvent appliqué à des doses et fréquences plus élevées que les herbicides qu'il remplace. Aussi la quantité réelle de matières actives (glyphosate et autres herbicides) épandues par ha a augmenté de 1996 à 2007 pour le soja et le coton, mais a diminué pendant la même période pour le maïs" (Ervin et al, 2010).

Par ailleurs, en s'associant bien aux techniques de conservation des sols (TCS), les PGM ont eu en la matière un effet assez bénéfique (ASA, 2001; Cerdeira, Duke, 2006; CTIC, 2010). Le principe des TCS est de maintenir une couverture du sol toute l'année en laissant les résidus végétaux à sa surface, et d'éviter les labours profonds ; on pratique alors du non-labour, du labour réduit ou en billons (rehaussements de terre). Leur avantage est de favoriser la vie microbienne du sol, d'éviter de le perturber et ainsi de réduire son érosion. Cette technique contribue aussi à la réduction des émissions de gaz carbonique et des pertes d'éléments nutritifs par lessivage. Cependant les adventices n'étant plus contrôlées par le labour, il faut

souvent utiliser plus d'herbicides. L'emploi de cultures tolérantes à un désherbant va bien avec les TCS car le glyphosate permet le contrôle des adventices après l'émergence des cultures même s'il n'y a pas eu de labour. Les TCS se sont développées aux Etats-Unis à partir du milieu des années 1980 et ont continué à progresser par la suite, entre autres grâce à leur bonne association avec les cultures TH. Ainsi à la fin des années 1990 les variétés tolérantes au glyphosate étaient plus souvent cultivées en TCS que les variétés conventionnelles (Fawcett, Towery, 2002; Fernandez-Cornejo, McBride, 2002; Mensah, Maysami 2010). Mais il est difficile de dire si le choix des variétés TH favorise l'usage des TCS, ou l'inverse (Ervin et al., 2010)! Aussi, même si ces techniques sont complémentaires, ne faut-il pas nécessairement attribuer tous les bénéfices des TCS aux PGM comme le font parfois les promoteurs de ces dernières.

Les effets des cultures TH sur l'environnement comprennent de nombreux aspects qu'il n'est pas possible ici de passer tous en revue. Nous avons privilégié l'analyse de l'évolution des quantités d'herbicides employés car cela fait l'objet de débats, mais les résultats varient selon le contexte et la période. Par ailleurs nous n'avons pas abordé la controverse sur le glyphosate et ses formulations, domaine complexe nécessitant de longs développements. Cet herbicide est souvent considéré comme ayant un assez bon profil toxicologique, mais divers travaux ont signalé des effets défavorables pour certains organismes, liés notamment aux surfactants ajoutés ou à ses produits de dégradation tel l'AMPA (Borggaard, Gimsing, 2008).

3. L'apparition d'adventices résistantes au glyphosate et les perspectives des cultures tolérantes aux herbicides

L'utilisation du glyphosate a fortement augmenté dans divers pays avec l'expansion des cultures tolérantes à celui-ci, mais aussi avec le développement des génériques le rendant moins coûteux, la progression de son usage hors agriculture ou encore avec les TCS. Cet emploi accru du glyphosate, de surcroît souvent sans alternance suffisante d'une année à l'autre, a entraîné l'apparition d'adventices résistantes à ce désherbant (Cerdeira, Duke, 2006; Heap, 2010; Owen, Zelaya, 2005; Service, 2007; Waltz, 2010). Ce phénomène de résistance aux herbicides n'est pas nouveau : il s'est manifesté dès les années 1950 et en décembre 2010 il existait 348 biotypes et 194 espèces d'adventices devenues résistantes à une ou plusieurs familles d'herbicides (Heap, 2010). Par ailleurs il est observé pour le glyphosate même dans des pays sans variétés tolérantes à celui-ci, il n'est donc pas spécifiquement lié aux PGM (Duke, Cerdeira, 2010). Des adventices résistantes au glyphosate sont apparues dans plus d'une douzaine de pays, et aux Etats-Unis dans plusieurs Etats (Fig. 5) (Heap, 2010). Aux Etats-Unis en 2010 ce problème concernait environ 11 millions d'acres (4,5 Mha), soit un peu moins de 8% des surfaces cultivées en variétés tolérantes à un herbicide. Cette perte partielle d'efficacité du glyphosate est considérée comme préjudiciable car il doit désormais être complété ou remplacé par d'autres herbicides, d'où risque de nocivité et difficultés d'emploi accrues vu le profil relatif du glyphosate (Marsh et al., 2006). Le très fort essor de son usage depuis 15 ans sans suffisamment d'alternance de matières actives et de méthodes de désherbage apparaît peu durable (Ervin et al., 2010).

Ce développement d'adventices résistantes au glyphosate a un fort retentissement, y compris hors du milieu agricole. D'une part ce désherbant est le plus employé au monde, son marché total d'environ 5 milliards USD a représenté ces dernières années près de 30% des ventes mondiales d'herbicides. Sa perte d'efficacité en certains lieux aura un impact, d'autant plus que depuis 1997 le nombre de matières actives herbicides nouvelles commercialisées a régressé et les brevets en ce domaine déposés aux Etats-Unis ont également chuté (Gerwick, 2010). D'autre part les associations opposées aux PGM ont accueilli avec des commentaires sarcastiques le développement d'adventices résistantes au glyphosate, y voyant quasiment une réalisation de leurs prédictions. Mais l'apparition de ces adventices en divers lieux ne signifie pas que le glyphosate ne sera plus utilisé ailleurs. En effet diverses mesures sont mises en œuvre par les acteurs impliqués pour faire face à ce développement (Nandula, 2010).

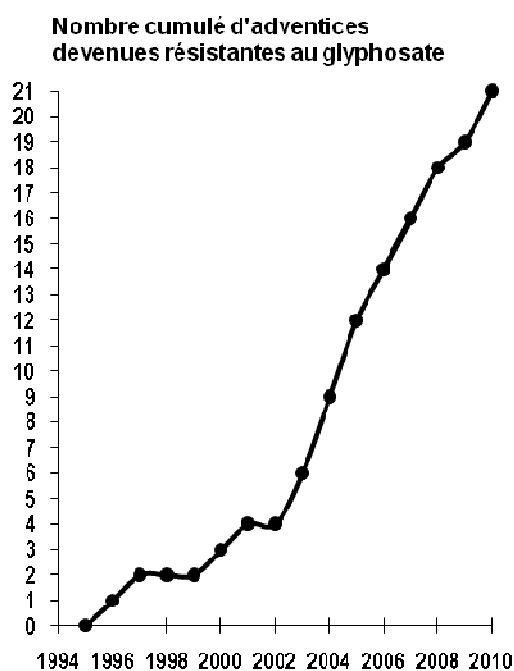


Figure 5. Nombre d'espèces adventices devenues résistantes au glyphosate dans le monde de 1996 à 2010 (toutes ne correspondent pas à des régions où il y avait des cultures tolérantes au glyphosate) (établi d'après les données de Heap, 2011)

En premier lieu on préconise une meilleure gestion du désherbage, en alternant les cultures et les molécules actives utilisées et en combinant ces dernières. Comme Monsanto considérait dans les années 1990 qu'il n'y avait quasiment pas de risque d'apparition d'adventices résistantes au glyphosate (Bradshaw et al., 1997), il n'y a sans doute pas eu suffisamment de conseils de bonne gestion agronomique au début de la diffusion de ces variétés, et les malherbologistes qui en donnaient furent peu écoutés. Mais depuis quelques années nombre de conseillers, de bulletins et de sites d'information des universités agronomiques ou associations de producteurs le recommandent. Ils insistent sur la nécessité du "*glyphosate stewardship*". Ce terme renvoie aux décisions de gestion et aux pratiques en découlant pour préserver l'utilité d'un caractère d'une culture. De leur côté les firmes, Monsanto et aussi de nouveaux entrants en ce domaine, comptent commercialiser des plantes transgéniques

tolérantes à d'autres herbicides tels le glufosinate et le dicamba (Bonny, 2009; Duke, Powles, 2008; Feng et al., 2010). Ceci pose question car certains dés herbants envisagés ont un profil toxicologique peu favorable. Par ailleurs des firmes projettent de mettre sur le marché des PGM tolérantes à deux herbicides (Gerwick, 2010), ainsi que d'autres espèces tolérantes au glyphosate ou un autre dés herbant. Mais des réticences s'expriment même aux Etats-Unis où les plus récentes espèces commercialisées ou envisagées (betteraves sucrières, luzerne, blé, etc.) suscitent des recours en justice de la part d'associations opposées...

Conclusion

L'emploi de cultures transgéniques TH comme méthode de dés herbage a suscité beaucoup de critiques et de rejet, notamment en Europe, d'autant plus que les annonces faites dans les années 1980 laissaient espérer que les biotechnologies permettraient de valoriser mieux le potentiel du vivant et de se passer de certains produits chimiques. Pourtant, dans divers pays, une part substantielle des agriculteurs les a adoptées et continuent de le faire. Cela témoigne d'avantages appréciables pour eux, malgré divers inconvénients. On a cherché à présenter les uns et les autres : du côté positif gain de temps, dés herbage plus facile, bonne association aux TCS, etc. mais du côté négatif emploi important du glyphosate remplaçant les dés herbants utilisés auparavant sans suffisamment d'alternance, renchérissement des semences, etc. D'assez nombreuses études scientifiques montrent que les agriculteurs et la société en ont retiré certains bénéfices économiques, mais il y a une grande diversité de cas vu la variabilité des contextes. Par ailleurs trop peu de travaux économiques intègrent l'évolution au fil du temps : l'intérêt des variétés TH a été assez sensible au début, mais ces dernières années l'apparition d'adventices résistantes induit des coûts et du travail supplémentaires en diverses régions (Carpenter, Gianessi, 2010).

L'analyse des quantités d'herbicides employées avec les variétés transgéniques par comparaison aux conventionnelles est fort difficile à faire par insuffisance de données accessibles issues d'enquêtes sur des échantillons représentatifs sur une durée assez longue. Aux Etats-Unis pour le soja et d'autres cultures, l'évolution au fil des années, quand une part croissante de la culture devient transgénique, montre d'abord une baisse, mais ensuite une certaine tendance à la hausse de l'emploi total des herbicides. Cependant il serait utile de considérer avec plus de détail les effets toxicologiques et environnementaux des herbicides en plus de leurs quantités. Ainsi il est assez difficile de tirer un bilan général. L'évolution des herbicides avec les PGM varie selon les espèces, le milieu, le contexte et par ailleurs avantages et inconvénients se côtoient. Une analyse au cas par cas est nécessaire.

La question des impacts des OGM étant fort controversée, il faut souligner que nombre de leurs "impacts" ne proviennent pas des OGM en eux-mêmes, mais des caractéristiques et des objectifs qui leur sont donnés via le type de nouveaux caractères introduits, du contexte où ils s'insèrent et enfin de la façon dont on les utilise. Au niveau économique, ce qu'on qualifie "d'impacts des OGM" ne relève-t-il pas souvent en fait des impacts du système économique englobant ? En effet, une partie de leurs soi-disant "impacts" ne provient pas *stricto sensu* du

génie génétique en lui-même, mais plutôt de la façon dont il est orienté, utilisé, réglementé et mis en œuvre, et par là du système économique englobant. Ainsi l'apparition dans divers pays cultivant des plantes tolérantes au glyphosate d'adventices résistantes à ce dernier est liée à la large adoption de ces cultures sans mesures de gestion durable concomitantes. Cela ne relève pas du génie génétique *per se*, mais surtout de déterminants économiques pesant sur les agriculteurs et les autres acteurs. Il en est de même pour l'expansion du soja au Brésil aux dépens de la forêt ou autre : les facteurs explicatifs sont économiques et ne découlent pas de la nature transgénique de la culture *per se*.

Ainsi la gouvernance de l'innovation et la façon dont on l'emploie qui dépendent du système économique jouent un rôle notable. Une meilleure gouvernance serait nécessaire pour permettre une mise en œuvre différente de l'innovation. Au niveau technique il serait nécessaire de pratiquer plus de rotation des cultures, des molécules herbicides et des méthodes de désherbage, voire de réserver les variétés tolérantes à un herbicide à des situations où ce dernier est fort difficile. Au niveau économique et social, il serait nécessaire que la recherche de rentabilité rapide à court terme laisse place à des approches plus durables...

Le fait que les premières PGM aient été tolérantes à un herbicide a contribué à les faire rejeter dans leur ensemble. Le grand public les perçoit souvent comme une technique sans intérêt et nocive. Les agriculteurs qui chaque année optent pour les variétés TH là où elles sont autorisées apprécient eux la facilité du désherbage et le gain de temps. L'écart de perception provient du fait que le désherbage est une tâche fastidieuse, mais nécessaire car la présence d'adventices affecte nettement le rendement¹. Par ailleurs les prix agricoles sont souvent bas, d'où la nécessité de pratiques culturales peu coûteuses ou économes en temps. En outre les méthodes alternatives de désherbage ont certains inconvénients, et le contexte local joue aussi un rôle notable dans le choix des agriculteurs. Dans les prochaines années des PGM ayant des caractères que l'on peut estimer plus intéressants que la tolérance à un herbicide devraient être proposées (composition modifiée, résistances à divers stress, meilleure tolérance à la sécheresse, meilleur rendement, etc.) comme l'indiquent les projets des firmes impliquées. Cela modifiera-t-il la perception de l'intérêt des cultures transgéniques ?

¹ On estime ainsi que pour les grandes cultures mondiales, en 2001-03, les adventices pouvaient entraîner selon les milieux une perte potentielle de 18 à 47 % de la production atteignable (ie qui aurait pu être obtenue si toutes les mesures de protection des cultures avaient été prises). Les méthodes de protection effectivement utilisées ont limité ces pertes à un niveau de 3 à 19 % de la production atteignable. Pour le soja les adventices auraient pu induire une perte de 35 à 39 % du potentiel, mais elles ne l'ont diminué que de 5 à 16% du fait des mesures phytosanitaires prises. Selon les milieux, les pertes potentielles dues aux adventices pourraient atteindre pour le maïs de 37 à 44 % de la production atteignable, pour le blé de 18 à 29 %, pour les pommes de terre 29 à 33% (Oerke, 2005).

Références

- Alexander C., 2006. Farmer decisions to adopt genetically modified crops. *CAB Reviews*, (045) 2006/1 1-9. doi: 10.1079/PAVSNNR20061045
- ASA (American Soybean Association), 2001. *Conservation Tillage Study*. Saint-Louis, Missouri: ASA.
- Barnes R.L., 2000. Why the American Soybean Association supports transgenic soybeans. *Pest Management Science*, 56 (7) 580-83.
- Benbrook C.M., 2009. *Impacts of Genetically Engineered Crops on Pesticide Use in the United States: The First Thirteen Years*. Boulder, CO: The Organic Center.
- Bonny S. 2008a. Genetically modified glyphosate-tolerant soybean in the USA: adoption factors, impacts and prospects. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 (1) 21-32.
- Bonny S., 2008b. Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide permettent-elles de réduire l'usage des pesticides ? Le cas du soja et du maïs aux Etats-Unis. *Innovations agronomiques*, (3) 193-212. <http://www.inra.fr/ciag/content/download/3323/30073/version/1/file/15-Bonny.pdf>
- Bonny S., 2009. Issues, impacts and prospects of the first transgenic crops tolerant to an herbicide. The case of glyphosate-tolerant soybean in the USA. 27. International Conference of Agricultural Economists. Pékin. <http://purl.umn.edu/51449>
- Borggaard O.K., Gimsing A.L., 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Manag Sci*, 64 (4) 441-456.
- Bradshaw L. D., Padgett S. R., Kimball S. L., Wells B. H., 1997. Perspectives on glyphosate resistance. *Weed Technology*, 11 (1) 189-198.
- Bullock D., Nitsi E., 2001. Roundup Ready Soybean Technology and Farm Production Costs: Measuring the Incentive to adopt genetically modified seeds. *American Behavioral Scientist*, 44 (8) 1283-1301. DOI: 10.1177/00027640121956827.
- Carpenter J., 2010. Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops. *Nature Biotechnology*, 28 (4) 319-21.
- Carpenter J., Gianessi L., 1999. Herbicide-Tolerant Soybeans: Why Growers are adopting Roundup Ready Varieties. *AgBioForum*, 2 (2) 65-72.
- Carpenter J.E., Gianessi L., 2010. Economic impacts of glyphosate-resistant weeds. In: V.K. Nandula ed. 2010. *Op. cit.*, pp. 297-312.
- Cerdeira A.L., Duke S.O., 2006. The Current Status And Environmental Impact Of Glyphosate Resistant Crops: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 35 (5) 1633-58. DOI: 10.2134/jeq2005.0378.
- CTIC, 2010. *Facilitating Conservation Farming Practices and Enhancing Environmental Sustainability with Agricultural Biotechnology*. West Lafayette (Indiana): CTIC (Conservation Technology Information Center).
- Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.L., Soulas G., 2005. *Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides*. Paris: Lavoisier, Tec&Doc.
- Duke S.O., Powles S.B., 2008 (ed.). *Glyphosate-Resistant Weeds and Crops*. *Pest Management Science Special Issue*, 64 (4) 317-496.
- Duke S.O., Cerdeira A.L., 2010. Transgenic crops for herbicide resistance, in: C. Kole C. et al., ed. *Transgenic Crop Plants Volume 2: Utilization and Biosafety*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 106-139.
- Ervin D.E., 2010. *The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States*. Washington, DC: The National Academies Press, National Research Council.

- Fawcett R., Towery D., 2002. Conservation Tillage and Plant Biotechnology: How New Technologies Can Improve the Environment By Reducing the Need to Plow. West Lafayette (Indiana): CTIC.
- Feng P.C.C. et al., 2010. Glyphosate-Resistant Crops: Developing the Next Generation Products. In: VK Nandula ed. 2010. Op. cit., pp. 45-66.
- Fernandez-Cornejo J., Caswell M., 2006. The First Decade of Genetically Engineered Crops in the United States. Economic Information Bulletin, (11). Washington: USDA ERS.
- Fernandez-Cornejo J., Hendricks C., Mishra A., 2005. Technology Adoption and Off-Farm Household Income. The Case of Herbicide-Tolerant Soybeans. *Journal of Agricultural & Applied Economics*, 37 (3) 549-563.
- Fernandez-Cornejo J, McBride W.D., 2000. Genetically Engineered Crops for pest management in US agriculture: farm level effects. Washington: USDA ERS, Report 786.
- Fernandez-Cornejo J., McBride W.D., 2002. Adoption of Bioengineered Crops. Washington: USDA, Economic Research Service. Agricultural Economic Report AER 810.
- Foreman L., Livezey J., 2002. Characteristics and Production Costs of U.S. Soybean Farms. Statistical Bulletin N SB 974-4. Washington: USDA-ERS.
- Gerwick C., 2010. Thirty years of herbicide discovery: surveying the past and contemplating the future. *Agrow World Crop Protection News*, (600), 24 sep 2010.
- Gianessi L.P., 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, Special Issue, 64 (4) 346-352. DOI: 10.1002/ps.1490
- Heap I., 2010. International survey of herbicide resistant weeds, Herbicide Resistance Action Committee and Weed Science Society of America. www.weedscience.org
- James C., 2010. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2010. ISAAA Briefs N 42. Ithaca, NY: ISAAA(International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications).
- Kovach J., Petzoldt C., Degni J., Tette J., 1992. A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides. *New York's Food and Life Sciences Bulletin* 139: 1-8. <http://www.nysipm.cornell.edu/publications/eiq/>
- Marra M.C., Piggott N.E., Carlson G.A., 2004. The Net Benefits, Including Convenience, of Roundup Ready® Soybeans: Results from a National Survey, NSF Center for Integrated Pest Management, Technical Bulletin, 2004-3, Raleigh, NC, 40p.
- Marsh S.P., Llewellyn R.S., Powles S.B., 2006. Social costs of herbicide resistance: the case of resistance to glyphosate. International Association of Agricultural Economists Conference. Gold Coast, Australia.
- McBride W.D., Brooks N., 2000. Survey Evidence on Producer Use and Costs of Genetically Modified Seed. *Agribusiness*, 16 (1) 6-20.
- Mensah E.C., Maysami R.C., 2010. Revisiting the synergy between no-till and roundup ready soybean technology. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 2 (3) 065-077.
- Nandula V.K. ed., 2010. Glyphosate Resistance in Crops and Weeds: History, Development, and Management. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Oerke E. C., 2005. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144 (1) 31-43. DOI:10.1017/S0021859605005708
- Owen M.D.K., Zelaya I.A., 2005. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides. *Pest Management Science*, 61 (3) 301-311. DOI: 10.1002/ps.1015.
- Powles S.B., 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. *Pest Management Science*, 64 (4) 360-65. DOI:10.1002/ps.1525.

- Qaim M., 2009. The Economics of Genetically Modified Crops. *Annual Review of Resource Economics* (1) 665-94.
- Service R.F., 2007. A Growing Threat Down on the Farm, *Science*, 316 (5828) 114-117.
- Surgan M., Condon M., Cox C., 2010. Pesticide Risk Indicators: Unidentified Inert Ingredients Compromise Their Integrity and Utility. *Environmental Management*, 45 (4) 834-41
- USDA ERS, 2010a. Commodity Costs and Returns, USDA Economic Research Service
- USDA ERS, 2010b. Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S. Data sets, USDA Economic Research Service. <http://www.ers.usda.gov/Data/BiotechCrops/> July 2010.
- USDA NASS, 1991-2007. Agricultural Chemical Usage. 1990 to 2006 Field Crops Summary. Annual publication. Cornell University: USDA Economics, Statistics and Market Information System, Albert R. Mann Library.
- USDA NASS, 1992-2010. Agricultural Prices. Annual publication. Washington DC: USDA National Agricultural Statistics Service.
- Waltz E., 2010. Glyphosate resistance threatens Roundup hegemony. *Nature Biotechnology*, 28 (6) 537-538.