

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

S. Bonny

INRA, UMR Economie publique INRA-AgroParisTech, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : bonny@grignon.inra.fr

Résumé :

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide (TH), actuellement largement prédominantes parmi les OGM, ont fait l'objet de nombreuses critiques notamment en raison de leur emploi concomitant d'herbicides. Mais celui-ci est-il similaire, plus ou moins élevé qu'en cultures conventionnelles ? L'article présente en premier lieu l'importance des cultures transgéniques TH dans le monde ainsi que dans les essais au champ aux Etats-Unis. Puis à partir du cas du soja tolérant au glyphosate, il examine les facteurs d'adoption de cette culture aux Etats-Unis où elle est très largement implantée, les avantages et les inconvénients au niveau agro-économique. Dans un troisième temps on étudie l'emploi des herbicides sur deux cultures transgéniques par comparaison aux conventionnelles, le soja et le maïs, ainsi que l'évolution des consommations d'herbicides sur l'ensemble de la culture au fil du temps après avoir signalé les problèmes de sources et de méthodes rencontrés. Dans le cas du soja, la culture transgénique consomme un peu plus d'herbicides que le soja conventionnel, mais c'est l'inverse pour le maïs TH qui emploie moins d'herbicides que le conventionnel. Cependant d'autres facteurs que l'utilisation d'une variété transgénique entrent en jeu, notamment les évolutions de prix des différents herbicides et les changements concomitants des techniques de culture. En dernier lieu on aborde les incidences environnementales de l'adoption des cultures transgéniques. On note une diminution de la toxicité des herbicides utilisés pour le soja et le maïs transgénique. Mais aussi l'apparition d'adventices tolérantes au glyphosate vu la très forte utilisation de ce dernier en remplacement des herbicides utilisés naguère. La conclusion souligne que ce qu'on qualifie d'impacts des OGM relève en fait largement des impacts du système économique dominant.

Mots-clés: OGM, culture transgénique, herbicide, pesticide, désherbage, tolérance à un herbicide, glyphosate, adventice, soja, maïs, environnement, résistance aux herbicides, économie agricole, Etats-Unis.

Abstract: Do transgenic herbicide tolerant crops make it possible to reduce the use of pesticides? The case of soybean and corn in the USA.

Transgenic herbicide tolerant (HT) crops, the most prevalent of the GM crops used throughout the world, have been strongly criticized, in particular because of the use of herbicides associated with them. However, to what extent is the use of herbicides in the case of HT crops similar to the case of conventional crops? This paper presents the importance of HT transgenic crops in the world and then more specifically in field trials in the USA. Secondly, based on the case of glyphosate-tolerant soybean, we examine the factors of adoption of this crop in the USA, where it is widely cultivated, as well as its advantages and disadvantages at the agro-economic level. Thirdly, the problems involving statistical sources and methods are explained. The use of herbicides in the field is studied in the case of two transgenic crops, soybean and corn, compared to the use of herbicides in the case of conventional crops. We also delve into changes in herbicide use in terms of the entire crop over time. In the case of soybean, farmers use a little more herbicide than in the case of conventional soybeans, but the opposite is true for HT corn for which farmers use less herbicide than for conventional corn. However, other factors than the use of a transgenic variety come into play, notably changes in the prices of various

herbicides and concurrent changes in cultural practices. Finally, we address the environmental impact of the adoption of transgenic crops. There has been a decrease in the toxicity of herbicides used for soybean and corn, but as well the emergence of weeds tolerant to glyphosate because of the high use of the latter replacing previously used herbicides. The conclusion emphasizes that what is qualified as "the impacts of GMOs" is in fact largely the result of the overall effects of the economic system: the governance of innovation is more at stake than the innovation itself.

Keywords: GMO, transgenic crop, herbicide, pesticide, weeding, herbicide tolerance, glyphosate, weed, soybean, corn (maize), environment, herbicide resistance, agricultural economics, USA.

Abréviations utilisées:

GM: génétiquement modifié ; TH : tolérant à un herbicide ; Bt: variété résistante à certains insectes grâce à la toxine Bt.

USDA NASS : Service National d'Enquêtes Statistiques du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis.

USDA ERS: Service de recherche économique du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis.

APHIS : Animal and Plant Health Inspection Service (du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis)

Introduction

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide représentent en 2008 la majeure partie des surfaces en OGM cultivées sur la planète. Sur les 114 millions d'ha d'OGM en 2007, 82% sont tolérants à un herbicide, ce caractère pouvant être seul ou associé à un ou deux autres comme des résistances à certains insectes. Cela témoigne du succès rencontré par ce nouveau caractère qui offre une nouvelle méthode de désherbage. Mais cela paraît aussi surprenant en particulier en Europe car ce caractère transgénique y est souvent jugé comme d'un intérêt faible ou nul. Cet OGM y fait en effet l'objet de vives critiques de la part de certains acteurs car il est considéré comme n'ayant d'intérêt que pour les firmes qui le commercialisent. Au contraire d'autres sources signalent les avantages pour les agriculteurs de cette méthode, d'où sa forte adoption, et l'économie en herbicides qu'elle permet. Aussi semble-t-il utile de mieux analyser les facteurs qui expliquent la diffusion rapide de ces plantes, leurs divers impacts et leurs enjeux. Quels intérêts et inconvénients présente cette nouvelle méthode de désherbage ? Après un rappel de son importance, on s'appuiera notamment sur une étude approfondie du cas américain pour esquisser un bilan de deux cultures transgéniques tolérantes à un herbicide, le soja et le maïs. On analysera les facteurs expliquant la forte adoption du soja tolérant au glyphosate. Puis, on cherchera à étudier si cette nouvelle méthode entraîne une augmentation de l'emploi des herbicides ou au contraire une réduction comme ce sujet fait l'objet de vives controverses. En dernier lieu, on analysera l'impact environnemental de ce type de cultures transgéniques.

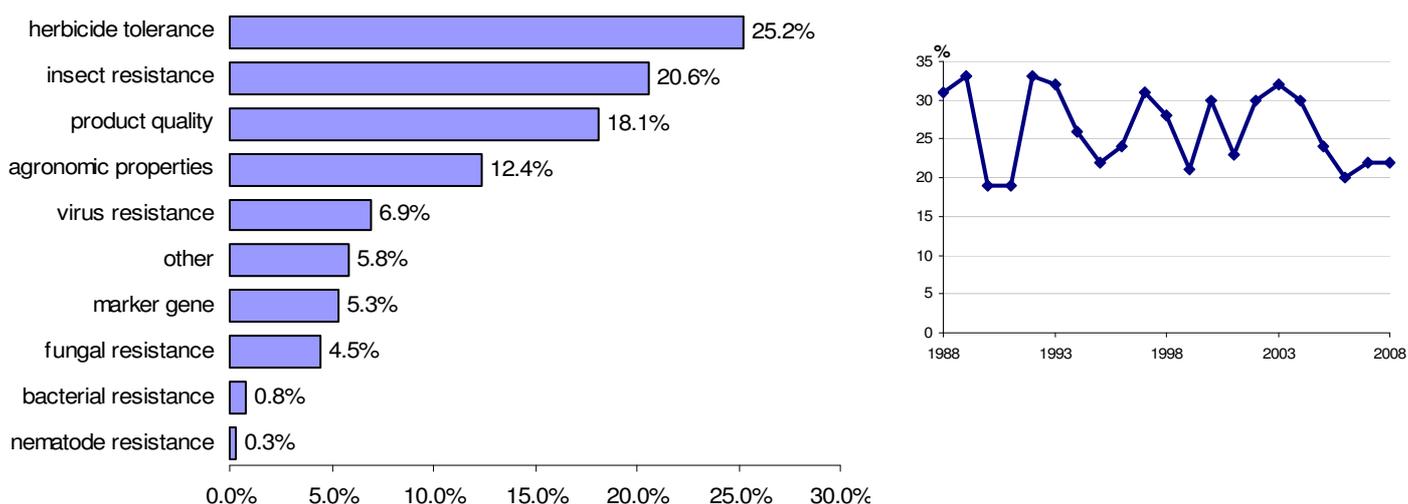
I. L'importance des cultures transgéniques tolérantes à un herbicide :

Les cultures transgéniques tolérantes à un herbicide représentaient, en 2007, 82% des surfaces en OGM, et environ 6% de l'ensemble des terres cultivées. Cette dernière proportion est modeste notamment parce que le nombre d'espèces transgéniques présentant ce nouveau caractère – comme le nombre d'espèces transgéniques déjà cultivées en général – est limité : soja, maïs, coton, colza. Mais d'autres plantes transgéniques tolérantes à un herbicide seront certainement commercialisées dans les prochaines années. En tout cas, il y en a de nombreuses qui ont été testées au champ aux USA, principal pays en matière de développement des OGM (la moitié des cultures transgéniques y sont cultivées). Plusieurs facteurs expliquent cette importance du caractère de tolérance à un herbicide dans les cultures en place et les essais :

- C'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.
- Via la vente 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 entreprise 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 parfois long. Des profits sur le glyphosate étaient essentiels pour Monsanto tant que l'autre secteur (les semences et la génomique) était encore dans les premiers stades de son développement.
- 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. Par ailleurs, cela s'associait bien à d'autres techniques en progression, en particulier les techniques de conservation des sols. En outre les OGM ont bénéficié aux USA d'un contexte favorable à leur développement.

Cette importance des cultures transgéniques TH pourrait être amenée à changer assez rapidement si l'on notait dans les essais aux champs ou parmi les plantes transgéniques proches de la commercialisation la présence de multiples nouveaux caractères différents. Or, ceci ressort peu des essais au champ. Si l'on étudie ceux qui ont lieu aux USA où ils sont de loin les plus nombreux, on observe que les plantes TH sont les premières en importance en termes d'essais réalisés et que leur proportion diminue très faiblement au cours du temps (Figure 1). Il est donc probable que seront encore commercialisées d'autres plantes TH, ou bien les mêmes plantes mais tolérantes à un autre herbicide. C'est bien ce que l'on observe dans le pipeline des grandes firmes même si de nouveaux caractères y sont également présents.

Figure 1 : Importance aux USA des essais au champ de plantes transgéniques exprimant un caractère de tolérance à un herbicide, 1988-2008 (environ 19060 essais au champ*) (d'après la base APHIS, 1 janvier 2009)



*certains essais concernent 2 traits ou plus. Les pourcentages sont calculés en proportion de tous les traits testés, non du nombre d'essais

a/ ensemble de tous les essais au champ de 1988 à 2008

b/ évolution de la tolérance à un herbicide en % du nombre total de traits testés chaque année de 1988 à 2008.

Il faut bien noter que toutes les variétés tolérantes à un herbicide ne sont pas transgéniques. Il en existe d'autres issues de mutagenèse ou de méthodes conventionnelles d'amélioration, mais elles ont suscité

à la fois moins d'intérêt car leur efficacité n'est pas parfaite et moins de controverse comme elles ne sont pas des OGM. Par ailleurs elles sont assez peu employées en termes de surfaces. On peut ainsi citer :

- la tolérance aux sulfonylurées (système "STS" de DuPont)
- la tolérance à l'imidazolinone (technologie "Clearfield" de BASF)
- la tolérance au cycloxydime ("Stratos ultra"), technologie "Duo System" de BASF.

Par ailleurs, on considérera ici surtout le cas de la tolérance au glyphosate introduite par transgénèse, sans analyser les plantes transgéniques tolérantes au glufosinate ("Basta") car elles sont actuellement peu répandues, même si certaines sont autorisées depuis plus de 10 ans et si d'autres devraient être commercialisées dans l'avenir.

II. Le bilan agro-économique des cultures transgéniques tolérantes à un herbicide: le cas du soja tolérant au glyphosate aux USA

Le choix de cet exemple s'explique par le fait que c'est actuellement et depuis 1996 la culture transgénique la plus répandue. D'une part, le soja transgénique est la première culture transgénique présente dans le monde : elle représentait 51 % de l'ensemble des surfaces en OGM en 2007. D'autre part en 2007 64% du soja cultivé dans le monde était transgénique et ce pourcentage se montait à 98 % en Argentine, 92 % aux USA et 64 % au Brésil (James, 2007). Les surfaces en soja GM aux USA représentent 27,7 M ha en 2008, soit environ la moitié de la surface totale de la France.

Quels facteurs expliquent ce très fort taux d'adoption aux USA ? De nombreux aspects jouent. En effet, le développement d'une innovation en agriculture dépend de facteurs économiques, sociaux, agronomiques, pédoclimatiques, institutionnels et culturels. D'une part, le contexte américain était propice avec un accueil assez favorable des biotechnologies. D'autre part, les farmers ont trouvé des avantages à utiliser le soja TH qui en ont compensé les inconvénients.

2.1 Des avantages agro-économiques qui compensent les inconvénients du soja TH

A l'échelle des exploitations, les facteurs de développement rapide du soja TH sont multiples outre l'aspect économique traité plus loin. Le Tableau 1 donne une vue d'ensemble de ses avantages et inconvénients qui doit être affinée dans chaque situation. L'un des premiers intérêts du soja TH pour les agriculteurs provient notamment du fait **qu'il simplifie, du moins à court terme, le désherbage**. Auparavant les agriculteurs utilisaient plusieurs herbicides et diverses adventices restaient difficiles à contrôler. La culture transgénique permet une **gestion plus facile du désherbage** car un seul produit peut suffire. Par ailleurs, la période où l'on peut traiter est un peu plus longue, ce qui entraîne une plus **grande flexibilité du travail** et diminue le risque d'intervenir trop tard si les conditions météorologiques empêchent de traiter à la période adéquate. De plus, les herbicides utilisés naguère étaient pour certains assez rémanents et pouvaient affecter les cultures suivantes et même le soja lui-même (UIUC, 1999 ; Carpenter, 2001 ; Carpenter et Gianessi, 1999-2002 ; Bullock et Nitsi, 2001 ; Nelson, 2001 ; Gianessi *et al.*, 2002 ; Alexander, 2006 ; Gianessi, 2008).

Pour les farmers, plusieurs aspects agro-économiques confèrent de l'intérêt au soja HT. Ce sont notamment :

- **la gestion du désherbage relativement plus facile et la simplification du traitement herbicide** libèrent du temps pour d'autres activités. Cet aspect difficilement chiffrable est important car le métier d'agriculteur comporte de multiples tâches, parfois en concurrence lors des pointes de travail, *a fortiori* en cas de pluriactivité. Or celle-ci est fréquente dans tous les

pays, même aux USA. En tout cas le temps libéré a souvent une valeur importante pour les agriculteurs (Fernandez-Cornejo *et al.*, 2005 ; Gardner et Nelson 2007 ; Piggott et Marra, 2008).

- **la diminution du risque d'un désherbage raté** : avec le soja TH, la période où l'on peut épandre l'herbicide est un peu plus longue, ce qui est intéressant en cas d'intempéries ou de grandes surfaces. Mais un traitement trop tardif peut nuire au rendement (Knezevic *et al.*, 2003 ; Owen, 2007).
- **la culture de soja TH va souvent de pair avec d'autres techniques** comme une culture en rangs plus serrés et les techniques de "conservation des sols" (TCS) (Barnes, 2000 ; Marra *et al.*, 2004 ; Cerdeira et Duke, 2006). Ces dernières se développent en raison de divers programmes pour limiter l'érosion et préserver les sols : en 2004, 61 % du soja était cultivé ainsi (CTIC, 2004). Divers travaux soulignent la bonne association entre les TCS et les cultures TH qui permettent de résoudre les problèmes d'adventices que l'on rencontrait naguère avec ces techniques (ASA, 2001 ; Fawcett et Towery, 2002 ; Sanvido *et al.*, 2007). De fait, les enquêtes de l'USDA montrent qu'en 2002 la proportion de TCS était plus élevée (67%) avec les variétés GM qu'avec les variétés non GM de soja (51%).

Tableau 1 : Les avantages et inconvénients du soja tolérant 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 travaux. - marge assez voisine ou très légèrement plus élevée que celle du soja conventionnel comme le coût des traitements herbicides est réduit. - moindre risque économique de désherbage raté. - rotation des cultures plus faciles : le glyphosate non rémanent ne nuit pas à la culture suivante contrairement à d'autres herbicides - diminution assez fréquente du nombre de traitements herbicides. - 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 étant peu toxique induit une diminution de l'impact sur l'environnement des herbicides employés par comparaison au soja conventionnel. - légère réduction du nombre de passages de tracteurs ou épandeurs. - souvent associé aux TCS qui réduisent l'érosion du sol et ont un impact environnemental positif. <p>3. Sécurité sanitaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - le glyphosate remplace d'autres herbicides souvent plus toxiques, d'où réduction des risques 	<p>1. Agro-économiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - surcoût de la semence en raison des "technology fees". - plus grande dépendance envers les firmes d'agrofourniture si un contrat d'engagement stipule de ne pas réutiliser une part de la récolte comme semence. - pour le soja très faible risque de polliniser des cultures de soja voisines, mais nécessité croissante de séparer les diverses récoltes pour éviter le mélange de graines. - plus grande attention nécessaire dans la chaîne de fabrication des semences afin d'éviter la présence accidentelle de graines GM dans un sac de semences certifié non OGM. - risque de difficultés à maîtriser les repousses de la culture précédente si elle était tolérante au même herbicide. - augmentation de la suspicion de certains consommateurs envers les produits agricoles, d'où risque de difficulté parfois pour vendre ou exporter. <p>2. Environnementaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - la croissance de l'emploi du glyphosate peut induire le développement d'adventices résistantes à cet herbicide. Dans ce cas d'autres herbicides souvent plus toxiques devront être employés en remplacement. <p>3. Sécurité sanitaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - risque potentiel d'accumulation de métabolites de dégradation du glyphosate et de ses adjuvants dans la plante ?

Mais l'engagement par contrat de ne pas réutiliser sa semence la campagne suivante renchérit le coût de cet intrant. Aux USA en 1998, 15 à 20% des surfaces de soja étaient ensemencées par des graines provenant de la récolte précédente de l'agriculteur, et dans d'autres pays comme l'Argentine (gros producteur de soja), cette proportion atteignait 25 à 35% et était augmentée par les achats à d'autres agriculteurs hors circuits commerciaux officiels (US-GAO, 2000). Cependant les firmes ont tenu compte de cet élément dans leur politique de prix des semences transgéniques : ainsi pour le soja TH ces dernières étaient vendues beaucoup moins cher en 1998 en Argentine qu'aux États-Unis. Pour les farmers, l'une des principales questions en la matière est l'évolution du prix du "technology fee". Le témoignage d'un farmer interrogé sur la question des contrats donne un éclairage sur leur point de vue.

« Les agriculteurs pour la plupart admettent les contrats demandés par Monsanto. Ils voient les bénéfices du programme et le fait que Monsanto a besoin d'un retour sur investissement. Ils n'aiment certes pas le fait de ne pas pouvoir ressemer une part de leur récolte, mais les agriculteurs achetaient de plus en plus de nouvelles semences chaque année avant que la nouvelle technologie RR devienne disponible. L'une des raisons de ne pas ressemer leurs semences est l'amélioration rapide dans les variétés RR chaque année. Non seulement conserver sa semence est illégal, mais vous avez besoin d'avoir la génétique la plus performante sur l'exploitation dès que possible. Un boisseau par acre de gain de rendement rembourse le coût de la nouvelle semence. Mais il pourrait y avoir plus de résistance chez les agriculteurs aujourd'hui envers Monsanto à cause de la hausse des "technology fees" » (agriculteur de l'Illinois, communication personnelle).

Les flux de gènes entre des cultures voisines de soja conventionnel et de soja GM ne posent pas de problème ici alors qu'en Europe ils font l'objet de vives préoccupations pour la plupart des OGM. En effet le soja, plante à 99 % autogame, induit fort peu de risques de pollinisation fortuite de cultures voisines non OGM de même espèce comme cela est le cas pour le colza et le maïs. Mais la vigilance s'impose en divers domaines, en particulier à l'amont lors de la chaîne de fabrication des semences, et à l'aval pour éviter le mélange accidentel de graines GM avec des graines certifiées "GM free" que choisit un petit nombre d'agriculteurs pour vendre sur des marchés spécifiques avec une prime.

2.2 Un intérêt économique variable, assez souvent positif, du soja transgénique

L'écart de marge entre le soja TH et le conventionnel est difficile à quantifier car les coûts de production du soja varient fortement selon les exploitations (Foreman et Livezey, 2002) (Figure 2). De plus les prix des semences, des herbicides et du soja ont varié au cours des dernières années (Bullock et Nitsi, 2001 ; Ash, 2001). En général pour le soja TH, le surcoût de la semence transgénique est compensé par une moindre dépense en désherbants due à un prix un peu plus bas du glyphosate et à un nombre total de traitements moins élevé (Sankula *et al.*, 2005). Aussi les coûts de production du soja GM sont en général légèrement plus faibles et les marges légèrement plus élevées. Mais l'écart entre soja TH et conventionnel dépend des adventices présentes et des herbicides (ou autres moyens de contrôle) utilisés : il existe une certaine gamme en conventionnel comme en transgénique, Monsanto proposant plusieurs formulations selon le type d'adjuvants et la concentration, sans oublier les génériques du glyphosate. De la sorte, le poste "semences + herbicides" est un peu plus faible en soja TH pour une part des surfaces, mais pas toujours. En tout cas, ce coût a diminué chez beaucoup d'agriculteurs entre 1996 et 2000, qu'ils utilisent des variétés transgéniques ou non. En effet, les firmes commercialisant des herbicides en ont diminué les prix dans la deuxième moitié des années 1990 pour tenter de lutter contre la concurrence des cultures TH (cf. Figure 6).

Pour étudier l'intérêt d'une technique, on cherche souvent à comparer les coûts de production ou la marge de la culture avec la nouvelle technique et en conventionnel. Cependant, cela présente des limites car la comparaison est très liée aux rapports de prix qui peuvent se modifier. Aussi est-il utile de la compléter par une analyse en termes de quantité de moyens de production employés. De plus, une

notion ancienne souvent oubliée doit être rappelée : il faut considérer l'exploitation comme un système et éviter d'étudier une production isolément. En particulier, établir le coût de production d'une culture indépendamment des autres productions possibles et de son interaction avec le fonctionnement de l'ensemble de l'exploitation peut donner une vue erronée car cela néglige divers coûts d'opportunité et les effets "système". Ainsi le soja TH peut avoir pour l'agriculteur des avantages supplémentaires : simplification du désherbage libérant du temps pour d'autres productions ou activités, association assez bonne avec les TCS d'où développement de celles-ci (effet de synergie), non rémanence de l'herbicide,... Enfin le calcul de rentabilité micro-économique néglige souvent les coûts externes environnementaux, économiques ou de plus long terme.

Ainsi, le soja TH présente divers intérêts agro-économiques pour les farmers, ce qui explique son adoption rapide. Aux USA, le maïs HT s'est diffusé plus lentement par comparaison d'une part parce que son intérêt était un peu moindre que celui du soja HT compte tenu des autres possibilités en désherbage, d'autre part à cause des impératifs de rotation (Figure 3). En effet, une succession maïs-soja tolérants tous deux au glyphosate risque de poser des problèmes pour le contrôle des éventuelles repousses de maïs dans le soja.

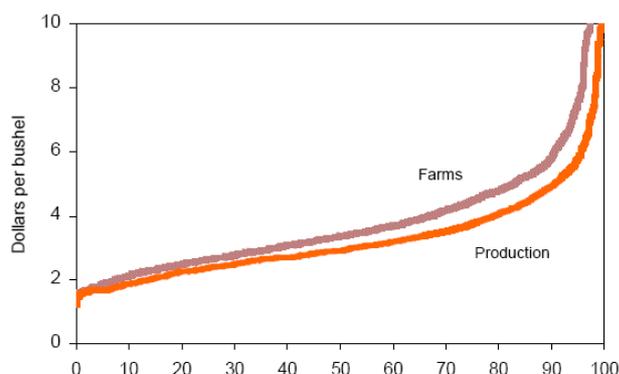


Figure 2 : Fréquence cumulée des coûts de production du soja (en \$ par boisseau) selon les exploitations en 1997. Source: Foreman, Livezey 2002, d'après l'enquête ARMS (Agricultural Resource Management Survey) 1997.

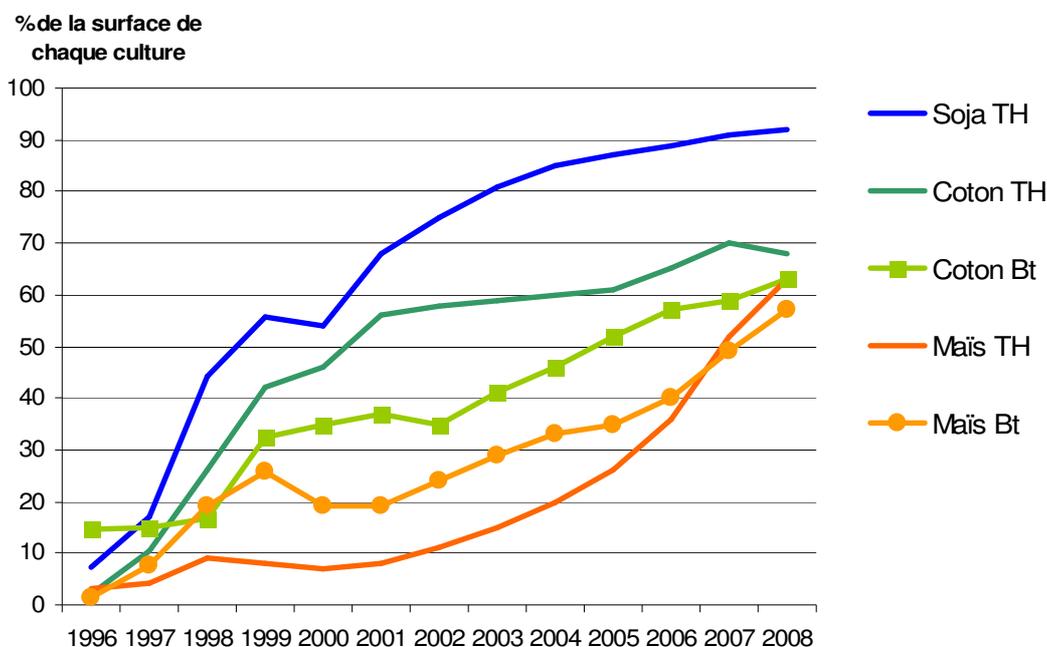


Figure 3 : Évolution de l'adoption des différentes cultures transgéniques aux USA. Pour chaque culture figure le pourcentage des surfaces en transgénique, ce qui induit un double compte pour les variétés ayant à la fois des caractères TH et Bt (cela explique que pour le coton et le maïs la somme des % soit supérieure à 100) (Source : USDA-ERS, 2008a).

III- L'emploi des herbicides : des bilans variés selon les cultures transgéniques et les études considérées.

3.1 Les questions de sources et de méthodes

L'évolution de l'emploi des pesticides avec les OGM est à voir au cas par cas car elle varie selon le type de caractère nouveau introduit, la plante considérée et le contexte pédoclimatique et socioéconomique. Avec une culture tolérante au glyphosate, les herbicides conventionnels usuels sont supprimés en très grande partie et le glyphosate se substitue à eux. Mais les herbicides conventionnels sont employés à des doses très variables par ha, les préconisations pouvant varier de 10 g/ha à 1,3 kg/ha selon la molécule ; de son côté, le glyphosate est souvent épandu à la dose d'environ 0,75 kg/ha. Ainsi, si par exemple 1,5 traitements de glyphosate remplacent 3 traitements conventionnels, le bilan en quantité en kg/ha sera fort variable selon les désherbants employés auparavant, mais cela n'aura pas vraiment de sens. Il est en effet nécessaire de pondérer le niveau d'emploi des herbicides par la prise en compte de leurs conditions d'utilisation et par des indicateurs de toxicité et d'écotoxicité si l'on veut pouvoir apprécier leurs impacts environnementaux et toxicologiques.

Divers travaux ont cherché à analyser l'évolution de l'emploi des herbicides avec les variétés TH. Mais cela reste fort difficile à appréhender car il existe très peu d'enquêtes détaillées accessibles qui permettent de comparer les désherbants utilisés en culture conventionnelle et en culture TH. De plus à supposer que cette comparaison soit possible, il faudrait vérifier qu'elle se fait « toutes choses égales par ailleurs », c'est-à-dire que les soles des cultures conventionnelles et transgéniques sont bien similaires. Autrement dit qu'il n'y a pas d'autre facteur source de différence de consommation que la nature de la culture (les farmers pouvant par exemple utiliser la culture transgénique là où l'infestation en adventices est la plus forte). Il faudrait dans l'idéal séparer les divers facteurs d'hétérogénéité avant d'établir les effets de l'usage de variétés transgéniques (Heimlich, 2000 ; Fernandez-Cornejo et McBride, 2002 ; Bonny et Sausse, 2004). En effet, il serait erroné de faire porter à la culture transgénique des économies ou des accroissements d'emploi de désherbants qui viennent d'autres facteurs concomitants

Pour analyser le changement dans l'emploi des herbicides avec l'adoption d'une culture transgénique comme le soja TH, il faut également disposer de données suffisamment fines et détaillées en la matière. Concrètement trois types de sources et de méthodes peuvent être mobilisées :

- aux USA, les services statistiques du ministère de l'agriculture (USDA-NASS) effectuent des enquêtes annuelles sur les consommations d'herbicides pour le soja, le maïs, le coton et d'autres productions. Mais les résultats sont fournis de façon globale pour l'ensemble des soles de chaque culture sans différencier l'emploi des herbicides sur les variétés transgéniques et conventionnelles. On ne peut donc pas comparer directement les consommations des deux types de variétés, mais seulement analyser l'évolution des consommations au cours du temps : comment l'emploi des herbicides a évolué au fur et à mesure que se développait la culture transgénique (passant de son absence à un pourcentage plus ou moins élevé de la sole). Des données sont disponibles jusqu'en 2006.
- on peut chercher à comparer cultures conventionnelles et transgéniques sur le critère de l'emploi d'herbicides aux USA à partir des sondages d'un cabinet de conseil DMRkynetec (auparavant Doanes Marketing Research) qui effectue des enquêtes marketing sur les exploitations américaines et dispose de données sur les consommations d'herbicides par culture d'un échantillon de plusieurs milliers d'exploitations de 1998 à 2008. Malheureusement, l'acquisition de ces données est extrêmement coûteuse et elles ne peuvent pas être publiées de façon détaillée.
- des données à dire d'experts qui comparent l'emploi des herbicides en cultures transgénique et conventionnelle en tenant compte de leur évolution au cours du temps peuvent aussi être

sollicitées. Le NCFAP, National Center for Food and Agricultural Policy, a publié divers travaux pour diverses années et cultures reposant sur cette méthode.

Les trois types de sources ont des intérêts et limites ; dans le cas du soja et du maïs aux USA elles donnent des résultats légèrement différents ce qui n'est pas surprenant vu les erreurs d'échantillonnage. Présentons plus précisément ces données. En premier lieu, le service statistique du ministère de l'agriculture (USDA NASS) effectue des enquêtes par sondage chaque année auprès des agriculteurs pour les principales cultures afin d'évaluer l'utilisation de pesticides. Mais ces enquêtes établissent l'usage des produits de traitements de façon globale par culture sans séparer l'emploi sur une même culture GM et non GM. Toutefois, l'utilisation sur les deux types de variétés pourrait être évaluée pour de rares années où ont lieu des enquêtes plus approfondies de l'USDA, les enquêtes ARMS (Agricultural Resources Management Survey). Mais il faut pour cela avoir accès aux fichiers individuels détaillés de l'enquête, ce qui ne nous a pas été possible. On dispose seulement de résultats différenciés des cultures GM et non GM pour l'année 1997-98 où un dépouillement et une analyse détaillée ont été effectués par les services de l'USDA, mais cette année est déjà ancienne. L'évolution de l'emploi des herbicides liée à l'expansion des cultures tolérantes au glyphosate peut donc être seulement étudiée de façon globale sur l'ensemble de chaque culture, ce qui apporte déjà diverses indications. Ces enquêtes de l'USDA sur les herbicides utilisés sont des enquêtes par sondage qui concernent la plupart des Etats producteurs de soja, mais avec un nombre variable d'Etats selon les années. De ce fait, la surface de soja US représentée dans l'enquête varie selon les années de 80% à 96%, parfois exceptionnellement 70%. Pour éliminer ces variations, nous avons ramené les herbicides utilisés à la surface totale de soja incluse dans l'enquête chaque année, établissant ainsi des doses moyennes de désherbants par ha. Les valeurs peuvent être comparées d'une année à l'autre comme les Etats non enquêtés cultivent de faibles quantités et ont ainsi peu d'influence sur la moyenne. Cependant, vu les variations d'échantillonnage d'une année à l'autre, ces doses d'herbicides par ha global de culture GM et non GM doivent être considérées avec prudence : ce sont des évaluations approchées.

Nous avons aussi utilisé les résultats des enquêtes accessibles de DMRkynetec qui offrent l'avantage de donner la consommation d'herbicide pour les variétés transgéniques et conventionnelles. Cependant, pour les années récentes, comme la proportion de culture conventionnelle est assez faible, l'erreur d'échantillonnage peut être assez importante pour cette dernière. Enfin, les enquêtes établies à dire d'experts donnent de leur côté des résultats assez approchés, qui peuvent être biaisés : ce sont surtout des ordres de grandeur et des outils de réflexion. Les cas du soja et du maïs tolérants au glyphosate sont pris ici comme exemple compte tenu de leur importance en surface aux USA et en tant que culture d'exportation.

3.2 L'évolution de l'emploi des désherbants sur le soja tolérant à un herbicide : une croissance rapide du glyphosate remplaçant progressivement une grande part des herbicides antérieurs.

L'analyse de l'évolution des traitements sur le soja de 1990 à 2006 à partir des enquêtes USDA NASS fait apparaître que la progression de la part des variétés transgéniques entraîne une substitution progressive du glyphosate à une large part des herbicides employés auparavant (Figure 4) (Kleter *et al.*, 2007). En particulier l'imazethapyr, le trifluralin, l'imazaquin, la pendiméthaline, le chlorimuron-ethyl, le metribuzin assez largement utilisés en 1995 le sont beaucoup moins en 2006. Ainsi, de 1995 à 2006, le pourcentage de surface de soja traité avec de l'imazethapyr a diminué de 44 à 3%, et le pourcentage traité avec de la pendiméthaline a baissé de 26 % à 3%.

Quelle a été l'évolution du nombre de traitements herbicides ? L'emploi de soja transgénique a souvent permis de réduire le nombre de traitements (Heimlich *et al.*, 2000 ; Benbrook, 2004 ; Fernandez-Cornejo et Caswell, 2006). Cette réduction est difficile à chiffrer compte tenu de la diversité des

pratiques de désherbage selon les adventices présentes et du fait que le glyphosate est (et était déjà avant 1996) utilisé aussi avec des variétés non transgéniques, notamment en cas de semis sans labour : les statistiques disponibles ne permettent pas de distinguer les divers types d'usage. Les enquêtes de l'USDA montrent une diminution du nombre de traitements de 1996 à 2001 suivie ensuite d'une réduction bien moins forte, puis d'une très légère reprise en 2006.

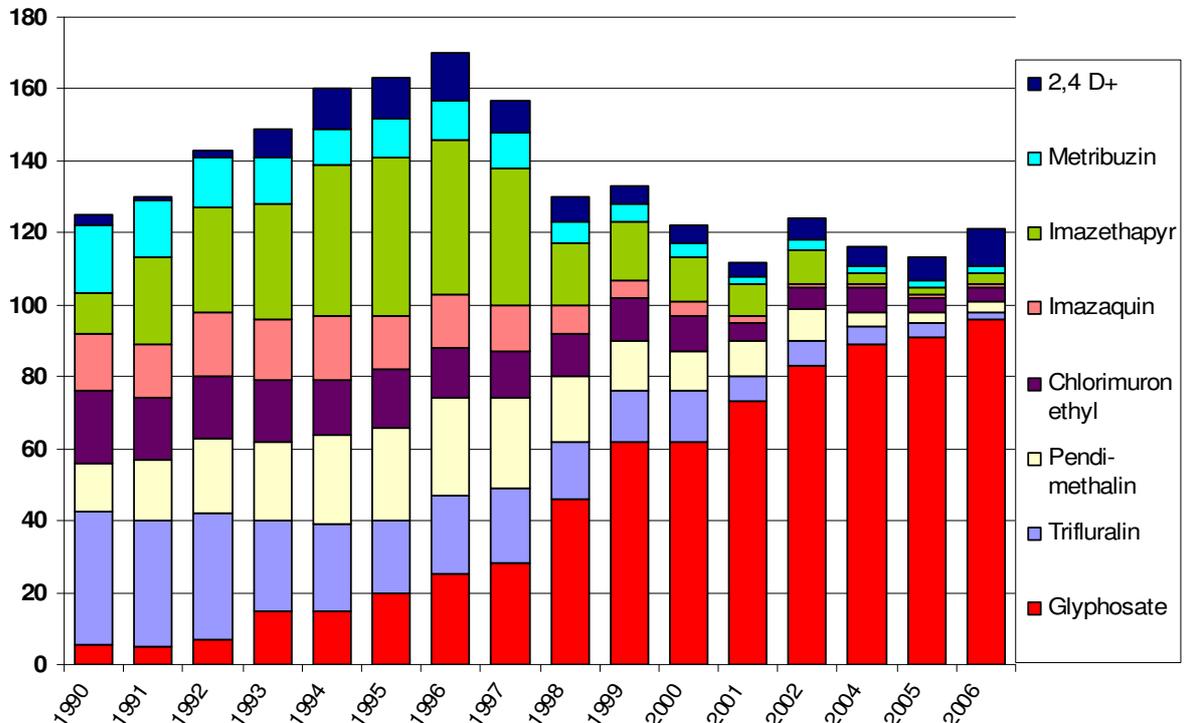


Figure 4 : Principaux herbicides utilisés sur l'ensemble des surfaces en soja de 1996 à 2006 (en % de la surface de soja traité par chaque herbicide) (d'après USDA NASS 1991-2007). Avec l'essor du soja tolérant au glyphosate, cet herbicide est utilisé de façon importante ; en effet, il remplace les herbicides utilisés auparavant ; la figure ne montre qu'une partie de l'ensemble des herbicides.

En matière de quantité d'herbicides utilisés sur une surface donnée de soja (Figure 5), celle de glyphosate a bien sûr augmenté du fait de l'essor des variétés transgéniques. De son côté, la quantité totale d'herbicides épanchés sur le soja (glyphosate inclus) a baissé dans un premier temps de 1996 à 2001, mais elle semble connaître ensuite une hausse notamment en 2002 et 2006. 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 (Figure 5). Cependant, on ne peut pas déduire 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 interviennent dans ces évolutions des herbicides utilisés. Outre les éventuels effets des variations climatiques, ce sont notamment le développement des techniques de conservation des sols (TCS, telles le non labour, etc.) et la baisse de prix des herbicides.

En effet avec les TCS, les adventices ne pouvant plus être contrôlées par leur enfouissement lors du labour, on observe assez souvent une hausse de l'usage des herbicides. En matière de prix des herbicides, la diffusion du soja TH ayant entraîné le remplacement d'une partie des désherbants de naguère par le glyphosate, pour limiter leurs pertes de marché et rester concurrentielles, les firmes agrochimiques qui les produisaient ont nettement baissé leurs prix à partir de 1996 (Figure 6). Cela a induit une réduction globale des coûts des traitements herbicides pour tous les producteurs de soja qu'ils utilisent des variétés transgéniques ou non (Lemarié, 2000 ; Bullock et Nitsi, 2001). Cette baisse de prix des herbicides a pu contribuer à un certain accroissement des quantités utilisées. De leur côté,

les semences ont vu leur prix croître au fil des années, ce qui fait que dans les coûts de production du soja, le poste semences a augmenté tandis que celui des herbicides diminuait (Figure 6). Cependant globalement entre 1997 et 2007, la part de ce poste « semences + herbicides » a relativement peu varié dans les coûts de production du soja.

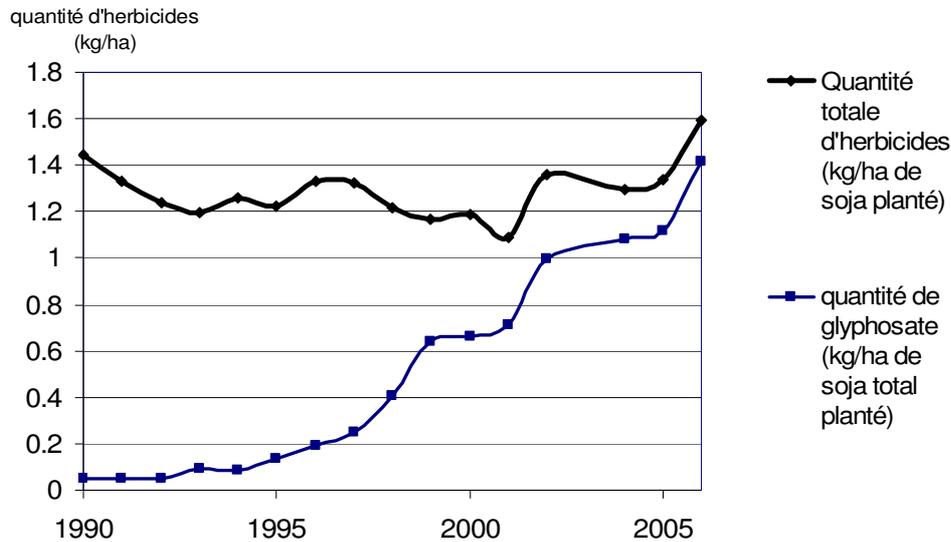
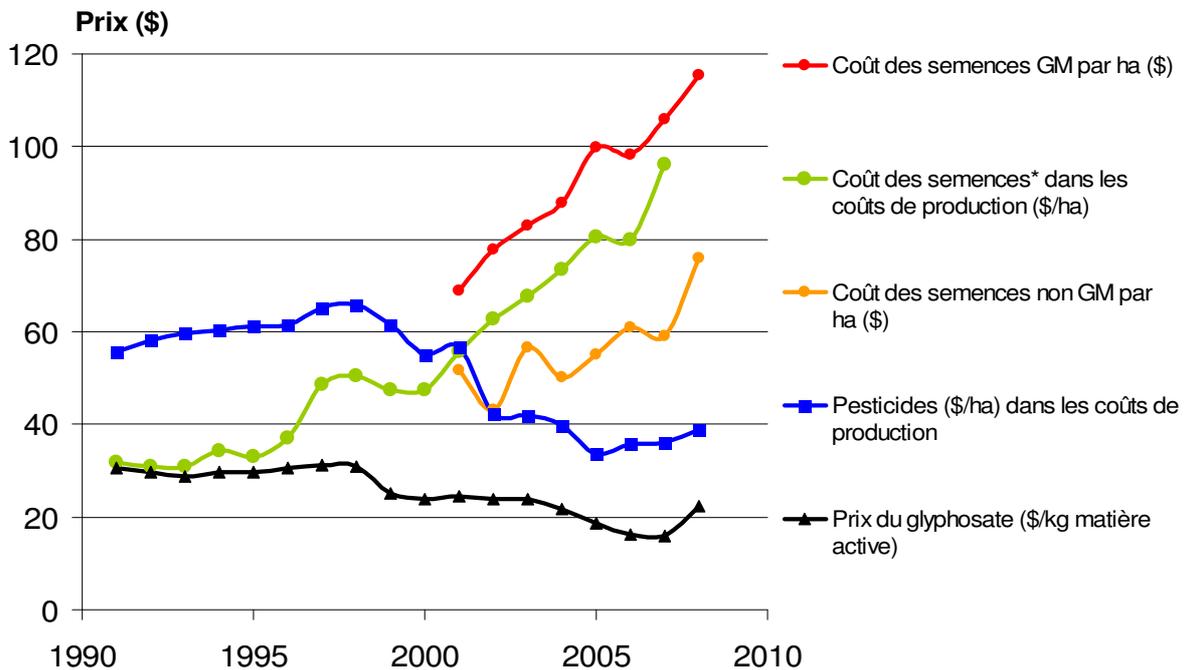


Figure 5 : Evolution des quantités d'herbicides, en particulier de glyphosate, sur la sole de soja, 1990 – 2006, d'après les enquêtes USDA-NASS.



* tout type de semences, d'après les coûts de production observés

Figure 6 : Prix du glyphosate (\$/ kg matière active), prix des semences GM et non GM semées par ha, et coûts des pesticides et des semences dans les coûts de production du soja par ha, 1991-2008 (les doses de semences sont une valeur moyenne, non la quantité réelle utilisée chaque année) (d'après USDA NASS, 1992-2008, et USDA-ERS, 2008b).

Ces observations à partir des enquêtes USDA-NASS sont à peu près corroborées par celles résultant des sondages DMRkynetec qui apportent également d'autres informations. Il apparaît que les cultures

de soja transgénique utilisent un peu plus d'herbicides que celles de soja conventionnel et l'écart augmente quelque peu au fil du temps (mais pas spécialement en 2002 et 2006). Les cultures transgéniques de soja utilisent en moyenne 16% d'herbicides en plus dans les années 1999-2002 et près de 30% en plus dans les années 2003-2006. Pour le soja transgénique, on observe une très faible progression des consommations au fil du temps ; au contraire pour le soja conventionnel, il y a une légère baisse de l'emploi des désherbants au cours du temps, ce qui fait que globalement l'usage des herbicides sur la sole de soja augmente très légèrement de 1998 à 2005, mais rediminue quelque peu en 2006. Finalement, **la consommation en herbicides du soja transgénique paraît un peu plus élevée que celle du soja conventionnel, mais elle ne connaît pas de hausse notable au cours du temps** (Figure 7). Toutes les études effectuées n'aboutissent pas à des résultats similaires, essentiellement en raison des sources utilisées comme c'est le cas de celle de Brookes et Barfoot (Brookes et Barfoot, 2008a et b). Certains auteurs utilisent en effet des évaluations établies à dire d'experts pour les consommations d'herbicides, mais celles-ci nous ont paru trop approximatives et pouvant être biaisées par rapport aux résultats d'enquêtes que nous avons utilisés de notre côté, même si ces derniers comportent aussi des limites.

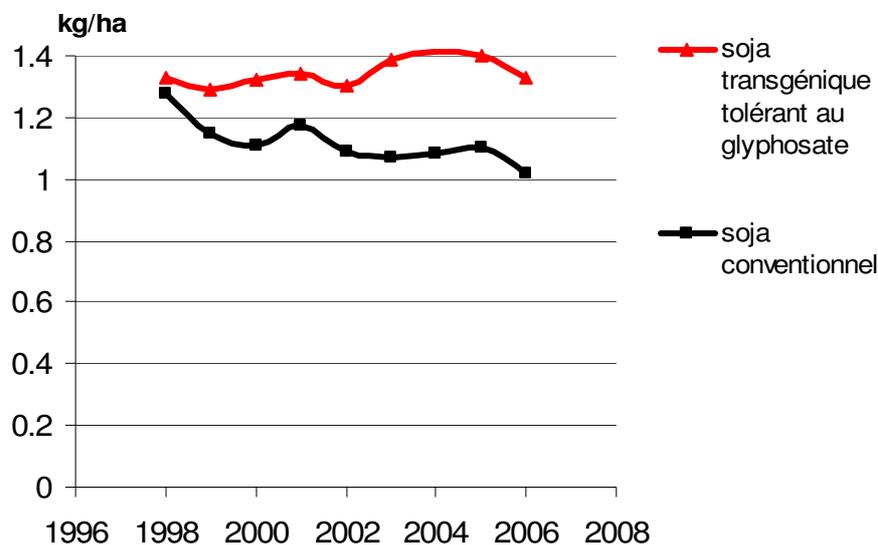


Figure 7 : Comparaison des consommations totales d'herbicides à l'ha (en kg de matière active) des sojas conventionnel et tolérant au glyphosate (source: enquêtes de DMRkynetec sur la période 1998-2006)

3.3 L'évolution de l'emploi des désherbants sur le maïs tolérant à un herbicide : une économie d'herbicides.

Comme cela a été indiqué, le maïs tolérant à un herbicide a eu aux USA moins de succès que le soja ou le coton tolérant à un herbicide (Figure 3), notamment car les problèmes de désherbage étaient moindres pour le maïs. Cependant il se développe plus rapidement depuis 2006. Il existe en fait 2 types de maïs tolérant à un herbicide, le maïs Liberty Link (LL) (maïs T25) lancé par AgrEvo (devenu Aventis, puis Bayer après diverses fusions-acquisitions) en 1997 et le maïs Roundup Ready (RR) de Monsanto introduit en 1998. En 2000, il y avait aux USA environ 1,2 millions d'ha de maïs RR et 0,8 millions d'ha de maïs LL. Ensuite le maïs RR semble être devenu encore plus prédominant (on ne dispose pas de statistique précise sur l'évolution de la proportion des 2 types de maïs TH). Il faut noter que depuis quelques années le maïs RR possède souvent un, voire deux autres caractères introduits par transgénèse conférant la résistance à certains insectes par la toxine Bt.

Avec ce maïs TH, en général un seul épandage de glufosinate ou de glyphosate n'est pas suffisant pour contrôler les adventices du maïs, on utilise souvent un autre épandage d'herbicide. Cependant, les données statistiques des enquêtes USDA-NASS et de DMRkynetec convergent : **il y a une diminution globale de l'emploi des herbicides sur le maïs au cours du temps** (elle avait d'ailleurs débuté dès le

début des années 1990). Par ailleurs ici, à la différence du soja, **moins d'herbicides en kg/ha sont utilisés sur la culture tolérante à un herbicide que sur la conventionnelle**, d'après les enquêtes de DMRkynetec. **On épand en moyenne moins d'herbicides sur le maïs TH que sur le maïs conventionnel** (Figure 8), l'écart étant de 20 à 37% selon les années.

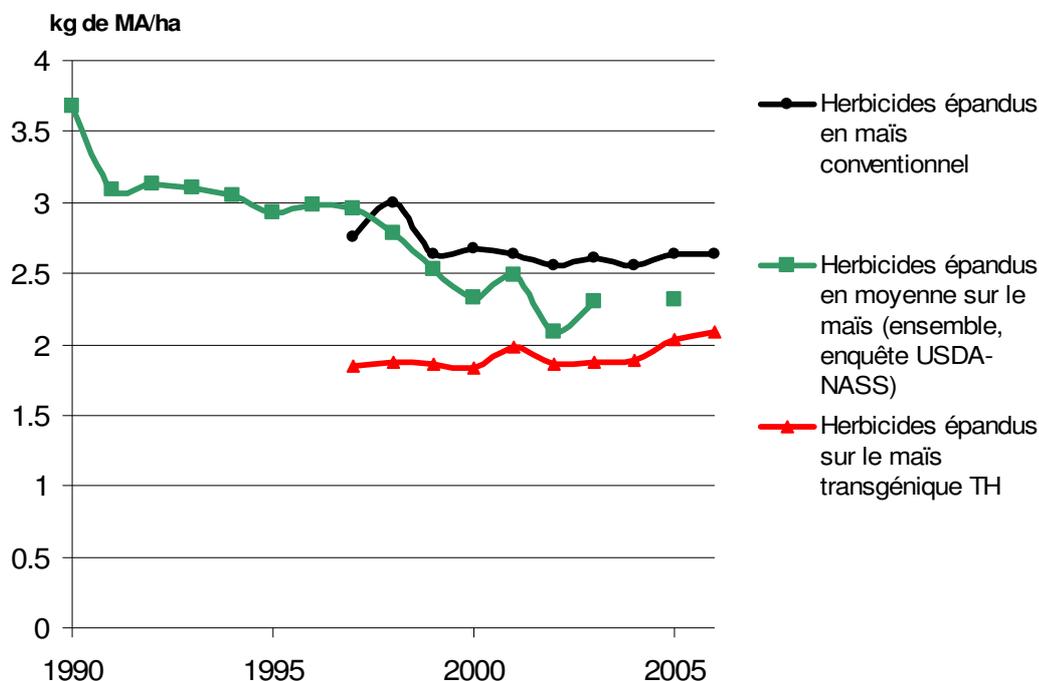


Figure 8 : Évolution de la consommation totale d'herbicides sur la sole de maïs aux USA de 1990 à 2005 (d'après les enquêtes USDA-NASS) et comparaison de la consommation d'herbicides en soja conventionnel et soja TH de 1997 à 2006 d'après les enquêtes de DMRkynetec (données en kg de matière active MA par ha)

IV. Les incidences environnementales

4.1 Diminution de la toxicité des herbicides utilisés

La quantité de désherbants à elle seule ne saurait être un indicateur valable de leurs effets sur le milieu. Il est nécessaire de pondérer chaque herbicide par des indicateurs rendant compte de ses impacts environnementaux et toxicologiques. Il existe en la matière nombre de paramètres et d'indices. Pour pouvoir faire des évaluations globales, on a recours à des indicateurs composites élaborés par combinaisons d'indicateurs de base : ils agrègent par diverses méthodes les données sur la toxicité des pesticides issues de multiples études (Devillers *et al.*, 2005). Mais ces indicateurs synthétiques sont eux-mêmes très nombreux : plus de 42 ont été répertoriés par Devillers *et al.* (2005). Parmi ceux-ci, nous avons utilisé l'EIQ, Environmental Impact Quotient, mis au point par Kovach (1992). En effet, il prend simultanément en compte trois aspects importants : les effets sur les travailleurs, les effets sur les consommateurs et l'eau, et ceux sur l'environnement. Ces divers effets sont établis à partir de paramètres de toxicité relatifs aux applicateurs, aux travailleurs agricoles, aux consommateurs, au lessivage, aux poissons, oiseaux, abeilles, insectes bénéfiques et organismes du sol. Vu son mode de calcul, plus l'EIQ est élevé, plus l'herbicide considéré est toxique et a un impact sur l'environnement et/ou la santé.

Nous avons donc pris l'EIQ de chacun des désherbants épandus sur le soja, puis nous avons établi l'EIQ pour l'ensemble des herbicides utilisés chaque année en multipliant la quantité de chaque herbicide employé par ha par son EIQ, puis en additionnant les valeurs. Ainsi, pour chaque année nous

évaluons l'EIQ au champ de tous les herbicides utilisés sur le soja, une sorte d'empreinte environnementale de ceux-ci. Il apparaît que le quotient d'impact environnemental sur l'ensemble du soja s'améliore (diminue) de 1996 à 2001, mais ensuite il remonte légèrement les années suivantes. **La toxicité des herbicides utilisés considérés dans leur ensemble a donc diminué nettement avec l'adoption et la diffusion des cultures GM, mais à partir de 2001 une certaine détérioration apparaît** : il semble y avoir une légère progression de l'EIQ sans qu'il retrouve cependant son niveau de 1996. D'autres travaux utilisant un autre indicateur ou d'autres modes de calcul obtiennent également une décroissance du niveau de toxicité des pesticides utilisés (Nelson et Bullock, 2003 ; Gardner et Nelson, 2008 ; Brookes et Barfoot 2008 a et b). Au Brésil et au Canada, on obtient aussi une amélioration de l'impact environnemental du soja transgénique par comparaison au conventionnel mais pas en Argentine.

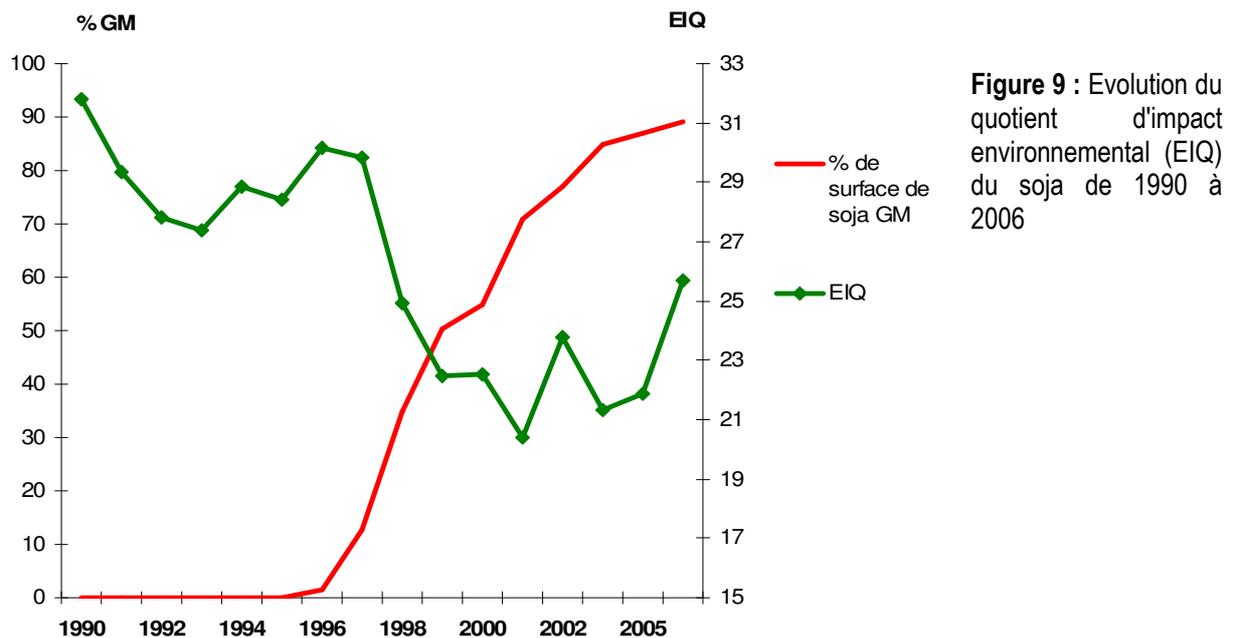


Figure 9 : Evolution du quotient d'impact environnemental (EIQ) du soja de 1990 à 2006

Pour le maïs, on observe aussi une diminution de l'impact environnemental au fil du temps à partir de 1997. Les cultures transgéniques semblent donc permettre, dans divers cas au moins, un allègement de l'empreinte environnementale des herbicides utilisés en utilisant notamment de moins toxiques. Cependant, cela renvoie à la question de l'évaluation du glyphosate, objet de controverse (cf. annexe)

4.2 L'apparition d'adventices résistantes au glyphosate

La forte croissance de l'emploi du glyphosate a diverses causes outre la progression rapide des cultures tolérantes à un herbicide (Woodburn, 2000). D'une part, le brevet sur le glyphosate ayant expiré en septembre 2000 aux USA (dès 1991 dans d'autres pays), les génériques se sont développés et la concurrence entre firmes a été très vive, d'autant plus qu'il s'agit de l'herbicide le plus vendu. Par ailleurs, l'importance de ses ventes de glyphosate était essentielle pour Monsanto tant que celles d'OGM restaient relativement limitées. La progression du glyphosate –Roundup de Monsanto ou générique– s'est faite notamment avec les plantes TH, mais aussi dans les usages non agricoles, ou encore avec les TCS. Ainsi, les statistiques de l'Environmental Protection Agency (EPA) montrent qu'aux USA l'emploi annuel du glyphosate en milliers de tonnes de matière active serait passé de 3,2 en 1987 à 16,3 en 1997, 32 en 1999 et à près de 50 en 2001 si l'on comptabilise tous ses usages,

agricoles et autres. Le glyphosate à usage agricole serait lui passé d'environ 3 000 tonnes en 1987 à 40 000 tonnes en 2001, soit une multiplication de sa quantité par 13 en 14 ans. (Aspelin et Grube, 1999 ; Donaldson *et al.*, 2002 ; Kiely *et al.*, 2004).

Cette forte hausse de l'emploi du glyphosate – naguère utilisé sur des surfaces bien plus restreintes – a entraîné depuis quelques années l'apparition d'adventices résistantes à ce désherbant (Owen et Zelaya, 2005 ; Cerdeira et Duke, 2006 ; Service, 2007 ; Duke et Powles, 2008 ; Powles, 2008). Même si certaines propriétés du glyphosate ont freiné cela par comparaison aux autres herbicides ayant connu un phénomène similaire, des adventices résistantes au glyphosate (9 fin 2008) sont déjà apparues aux USA dans divers Etats, ainsi qu'ailleurs dans le monde (15 au total fin 2008) (Figure 10) (Heap, 2009). Cette perte partielle d'efficacité du glyphosate est considérée comme préjudiciable car il devra être complété ou remplacé par d'autres herbicides qui risquent d'être plus nocifs ou plus difficiles à employer vu le profil relatif du glyphosate (Marsh *et al.*, 2006). En ce sens, la très forte expansion actuelle de l'emploi du glyphosate pourrait se révéler à moyen terme non durable, du moins dans un certain nombre de régions. Diverses mesures sont promues pour faire face à ce problème : cela va d'une meilleure gestion du désherbage par le glyphosate à la commercialisation annoncée de plantes transgéniques tolérantes à d'autres herbicides tels le dicamba, le glufosinate, etc. (Bonny, 2008 ; Duke et Powles, 2008).

Nombre cumulé d'adventices
devenues résistantes au glyphosate

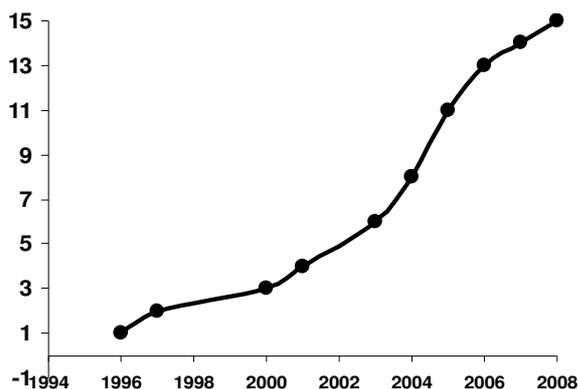


Figure 10 : Nombre d'adventices devenues tolérantes au glyphosate dans le monde depuis 1996 (toutes ne correspondent pas à des situations où il y avait des cultures tolérantes au glyphosate) (établi d'après Heap, 2009)

Conclusion

L'utilisation de cultures transgéniques TH comme méthode de désherbage a suscité beaucoup de rejet, notamment en France. Cela se trouve renforcé par les annonces faites dans les années 1980 selon lesquelles les biotechnologies permettraient de valoriser mieux le potentiel du vivant et par là de se passer de certains produits chimiques. Pourtant, dans divers pays, une part substantielle des agriculteurs les a adoptées. La majeure partie de la sole en soja est ainsi TH aux USA et en Argentine, ainsi qu'une bonne part du maïs ; plus récemment, la betterave TH introduite aux USA en 2008 s'est implantée sur une part importante de la sole. Cela témoigne d'avantages pour les agriculteurs malgré l'existence d'inconvénients. Nous avons cherché à analyser les uns et les autres : gain de temps, désherbage plus facile, bonne association aux TCS, etc. mais dépendance accrue envers un nombre restreint de firmes semencières et emploi important du glyphosate en remplacement des désherbants utilisés auparavant, etc.

L'analyse des doses d'herbicides employées sur les variétés transgéniques par comparaison aux variétés conventionnelles montre dans le cas du soja une consommation plus élevée et, dans le cas du maïs, une consommation plus faible d'herbicides. De même, l'évolution au cours du temps, quand une

part croissante de la culture devient transgénique, montre une légère tendance pour le soja à l'accroissement des consommations d'herbicides, et, pour le maïs, à leur baisse. Mais il ne suffit pas d'observer les quantités d'herbicides utilisés. Ce sont surtout leurs effets toxicologiques et environnementaux qui sont à considérer. On note en la matière une certaine amélioration des impacts environnementaux avec la culture transgénique de soja ou de maïs par comparaison à la conventionnelle.

Ainsi, il apparaît difficile de tirer un bilan général car, d'une part, l'évolution des herbicides avec les cultures transgéniques varie selon les cultures comme le montre les cas du soja et du maïs et, d'autre part, avantages (meilleur bilan environnemental en général des cultures transgéniques) et inconvénients (utilisation importante d'un seul type d'herbicides) se côtoient. Cela dépend du type de culture.

De façon plus large, il faut noter qu'on ne peut pas non plus parler des OGM en général, mais qu'il faut analyser ceux-ci au cas par cas selon le contexte et les cultures considérés. Par ailleurs, la question des impacts des OGM étant l'objet de fréquents débats, il faut souligner que nombre de « leurs impacts » ne provient pas des OGM en eux-mêmes, mais des caractéristiques et des objectifs qu'on leur donne via le type de nouveaux caractères introduits, du contexte où ils s'insèrent et enfin de la façon dont on les utilise. Et au niveau économique, ce qu'on qualifie "d'impacts des OGM" ne relève-t-il pas souvent en fait des impacts du système économique dominant ? En effet, une partie des "impacts des OGM" ne provient pas en fait *stricto sensu* du génie génétique en lui-même, mais plutôt de la façon dont il est orienté, utilisé, réglementé et mis en œuvre en pratique. Ainsi, le génie génétique *per se* ne demande pas de brevets ou de concentration des firmes, c'est le système économique et social dominant qui induit l'existence de brevets et de concentration et cela d'autant plus que la recherche agronomique publique a tendance à devenir moins importante.

En d'autres termes, même si beaucoup jugent les cultures transgéniques TH comme une nouvelle technique bien éloignée du développement durable, elle pourrait s'en approcher si elle était mise en œuvre de façon différente. Cela supposerait au niveau technique une meilleure rotation des différents types de culture, une alternance des herbicides et l'emploi d'autres méthodes (désherbage localisé ou mécanique, etc.). Ceci signifie une meilleure gestion et gouvernance de cette innovation. Il en est de même au niveau économique et social : il faudrait que la recherche de rentabilité rapide à court terme laisse place à des approches plus durables. Ainsi, la gouvernance de l'innovation et la façon dont on l'utilise qui dépendent du système économique dominant sont sans doute en jeu plus que l'innovation technologique elle-même.

Références bibliographiques

Alexander C., 2006. Farmer decisions to adopt genetically modified crops. CAB Reviews: 2006/1 N° 045. doi: 10.1079/PAVSNNR20061045

APHIS, 2009. USA Environmental Releases Database (information on field tests of GM organisms). USDA, APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service). Searchable Database available at the Information Systems for Biotechnology <http://www.isb.vt.edu/>

ASA (American Soybean Association), 2001 Conservation Tillage Study, Saint-Louis, MO, Nov. 2001, 22 p.

Ash M., 2001. Soybeans: Background and Issues for Farm Legislation, USDA-ERS report N° OSC-0701-01, July 2001, 9 p.

Aspelin A., Grube A.H., 1999. Pesticides Industry Sales and Usage: 1996 and 1997 Market Estimates, USEPA, Washington, Nov. 1999.

- Barnes R.L., 2000. Why the American Soybean Association supports transgenic soybeans, *Pest Management Science* 56, 580-583.
- Benbrook C.M., 2004. Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States: The First Nine Years, BioTech InfoNet, Technical Paper N. 7, Sandpoint, Idaho, USA, 53 p.
- Bonny S., 2008. Genetically modified glyphosate-tolerant soybean in the USA: adoption factors, impacts and prospects. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 21-32.
- Bonny S., Sausse C., 2004. Les cultures transgéniques permettent-elles de réduire l'usage des produits phytosanitaires ? Considérations à partir du cas du soja tolérant au glyphosate, *OCL Oléagineux, Corps gras, Lipides* 11, 85-91.
- Brookes G., Barfoot P., 2008a. Global Impact of Biotech Crops: Socio-Economic and Environmental Effects, 1996-2006. *AgBioForum* 11, 21-38.
- Brookes G., Barfoot P., 2008b. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2006. PG economics Ltd, Dorchester, UK, 118 p.
- 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, 1283-1301. DOI: 10.1177/00027640121956827.
- Carpenter J., 2001. Case Study in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology: Roundup Ready Soybeans and Bt field corn. NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, Jan. 2001, 56 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 1999. Herbicide Tolerant Soybeans: Why Growers are adopting Roundup Ready Varieties, *AgBioForum* 2, 65-72.
- Carpenter J., Gianessi L., 2000. Agricultural Biotechnology: Benefits of Transgenic Soybeans, NCFAP, Washington, April 2000, 105 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 2001. Agricultural Biotechnology: Updated Benefit Estimates. NCFAP, Washington, Jan. 2001, 48 p.
- Carpenter J., Gianessi L., 2002. Case Study in Benefits and Risks of Agricultural Biotechnology: RR Soybeans. In: Santaniello V., Evenson R.E., Zilberman D., (Eds.), *Market Development for Genetically Modified Food*, Wallingford, CABI Publishing, pp. 227-243.
- Cerdeira A.L., Duke S.O., 2006. The Current Status And Environmental Impact Of Glyphosate Resistant Crop: A Review, *Journal of Environmental Quality* 35, 1633-1658. DOI: 10.2134/jeq2005.0378.
- CTIC, 2004. National crop residue management survey, CTIC (Conservation Technology Information Center), West Lafayette, Indiana, USA et USDA-NASS, Washington.
- Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.L., Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides, *Lavoisier, Tec&Doc*, 278 p.
- Donaldson D., Kiely T., Grube A., 2002. Pesticides Industry Sales and Usage: 1998 and 1999 Market Estimates, USEPA, Washington, 2002.
- Duke S.O., Powles S.B., 2008. (Eds). *Glyphosate-Resistant Weeds and Crops*. *Pest Management Science*, Special Issue, 64, 317-496.
- Fawcett R., Towery D., 2002. Conservation Tillage and Plant Biotechnology: How New Technologies Can Improve the Environment By Reducing the Need to Plow. CTIC (Conservation Technology Information Center), West Lafayette, 2002, 24 p
- Fernandez-Cornejo J., Caswell M., 2006. The First Decade of Genetically Engineered Crops in the United States, USDA ERS, Economic Information Bulletin, 11, April 2006.
- 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, 549-563.
- Fernandez-Cornejo J., McBride W.D., 2002. Adoption of Bioengineered Crops. Agricultural Economic Report, N. AER810, Economic Research Service, USDA, Washington, 2002.
www.ers.usda.gov/publications/aer810/aer810.pdf

- Foreman L., Livezey J., 2002. Characteristics and Production Costs of U.S. Soybean Farms. USDA-ERS Statistical Bulletin N SB974-4. April 2002.
- Gardner J.C., Nelson G.C., 2008. Herbicides, glyphosate resistance and acute mammalian toxicity: simulating an environmental effect of glyphosate-resistant weeds in the USA. *Pest Management Science* 64, 470-478.
- Gardner J.G., Nelson C.H., 2007. Genetically Modified Crops and Labor Savings in US Crop Production, Paper presented at the 2007 Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting, 4-7 February 2007, Mobile, Alabama, 20 p.
- Gianessi L.P., 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, Special Issue, 64, 346-352. DOI: 10.1002/ps.1490
- Gianessi L.P., Silvers C.S., Sankula S., Carpenter J.E., 2002. Plant Biotechnology Current and Potential Impact For Improving Pest Management In U.S. Agriculture: An Analysis of 40 Case Studies, NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, 32 p.
- Heap I., 2009. International survey of herbicide resistant weeds, Herbicide Resistance Action Committee, and Weed Sci. Soc. Am. www.weedscience.org
- Heimlich R.E., Fernandez-Cornejo J., McBride W., Klotz-Ingram C., Jans S., Brooks N., 2000. Genetically Engineered Crops: Has Adoption Reduced Pesticide Use? *Agricultural Outlook* (USDA ERS), August 2000, 13-17.
- James C., 2007. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2007. ISAAA Briefs N 37. ISAAA, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications), Ithaca, NY.
- Kiely T., Donaldson D., Grube A., 2004. Pesticides Industry Sales and Usage: 2000 and 2001 Market Estimates, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, May 2004.
- Kleter G.A. et al. 2007. Altered pesticide use on transgenic crops and the associated general impact from an environmental perspective. *Pest Management Science*, 63, 1107-1115.
- Knezevic S.Z., Evans S.P., Mainz M., 2003. Yield penalty due to delayed weed control in corn and soybean, *Crop Management* Feb. 2003. DOI:10.1094/CM-2003-0219-01-RS.
- Kovach J., Petzoldt C., Degni J., Tette J., 1992. A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides, New York Agricultural Experiment Station, New York's Food and Life Sciences Bulletin 139. Cornell University, Ithaca, NY, 8 p.
- Lemarié S., 2000. Analyse économique du développement des cultures à base d'organismes génétiquement modifiés aux Etats-Unis, Volet 1: Le développement des OGM agronomiques, INRA-SERD, Grenoble, 42 p.
- 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 Poster paper, International Association of Agricultural Economists Conference, Gold Coast, Australia, August 12-18, 2006.
- Nelson G.C., 2001, (Ed.). *Genetically Modified Organisms in Agriculture, Economics and Politics*, Academic Press, London, 344 p.
- Nelson G.C., Bullock D.S., 2003. Simulating a relative environmental effect of glyphosate-resistant soybeans, *Ecological Economics* 45, 189-202. DOI:10.1016/S0921-8009(03)00011-9.
- Owen M.D.K., 2007. Genetically modified crops: successes and problems in the Midwest USA, *Proceedings of the 16th International Plant Protection Congress*, Glasgow, 2007.
- Owen M.D.K., Zelaya I.A., 2005. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides, *Pest Management Science* 61, 301-311. DOI: 10.1002/ps.1015.
- Piggott N.E., Marra M.C., 2008. Biotechnology Adoption Over Time In the Presence of Non-Pecuniary Characteristics that Directly Affect Utility: A Derived Demand Approach. *AgBioForum* 11, 58-70.
- Powles S.B., 2008. Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. *Pest Management Science* 64, 360-365. DOI:10.1002/ps.1525.

- Sankula S., Marmon G., Blumenthal E., 2005. Biotechnology derived crops planted in 2004. Impacts on US agriculture, NCFAP (National Center for Food and Agricultural Policy), Washington, 101 p.
- Sanvido O., Romeis J., Bigler F., 2007. Ecological impacts of genetically modified crops: ten years of field research and commercial cultivation, *Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology* 107, 235–278. DOI 10.1007/10_2007_048.
- Service R.F., 2007. A Growing Threat Down on the Farm, *Science* 316, (5828), 25 May 2007, 114-117. DOI: 10.1126/science.316.5828.1114.
- UIUC, 1999. Illinois Agronomy Handbook 1999-2000, University of Illinois, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, Urbana-Champaign, 245 p.
- US GAO, 2000. Information on prices of genetically modified seeds in the United States and Argentina, US General Accounting Office, Washington, 25 p.
- USDA ERS, 2008a. Adoption of Genetically Engineered Crops in the U.S. Data sets, USDA Economic Research Service. <http://www.ers.usda.gov/Data/BiotechCrops/>. July 2007.
- USDA ERS, 2008b. Commodity Costs and Returns, USDA Economic Research Service <http://www.ers.usda.gov/Data/CostsAndReturns/>
- USDA NASS, 1991 to 2007. Agricultural Chemical Usage. 1990 to 2006 Field Crops Summary, Annual publication from USDA Economics, Statistics and Market Information System, Albert R. Mann Library, Cornell University, USA.
- USDA NASS, 1992 to 2008. Agricultural Prices, Annual publication from USDA National Agricultural Statistics Service, Washington DC, USA, April.
- Woodburn A.T., 2000. Glyphosate: production, pricing and use worldwide, *Pest Management Science* 56, 309-312.

Annexe 1 : Le glyphosate: un profil toxicologique et environnemental favorable mais vigoureusement controversé

Extrait de

DELABAYS N., BOHREN C., 2007. *Le glyphosate: bilan de la situation mondiale et analyse de quelques conséquences malherbologiques pour la Suisse*. Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic. Vol. **39**, 333-339.

De nombreuses synthèses, détaillées et complètes, sur les aspects toxicologiques du glyphosate ou son impact sur l'environnement sont disponibles dans la littérature scientifique (Giesy *et al.*, 2000; Pelfrène, 2003; Williams *et al.*, 2000). Globalement, cette matière active présente un impact toxicologique et éco-toxicologique relativement modéré, comparativement à d'autres pesticides très utilisés.

Aspects sanitaires Le glyphosate est relativement peu soluble dans les graisses, ce qui minimise les risques de bio-accumulation dans la chaîne alimentaire. De plus, son mode d'action (inhibition de l'EPSPS) touche une voie métabolique propre aux végétaux. Globalement, sa toxicité pour les animaux et les humains est donc relativement modérée (Pelfrène, 2003). Pourtant, de plusieurs enquêtes menées auprès d'utilisateurs et de services médicaux, il ressort que les herbicides à base de glyphosate sont à l'origine d'un grand nombre de plaintes pour atteinte à la santé (Goldstein *et al.*, 2002). La plupart de ces plaintes concernent des irritations des yeux ou des voies respiratoires supérieures, qui peuvent être attribuées aux formulations du glyphosate. Ces dernières, souvent assez agressives pour assurer une bonne pénétration de la matière active dans les plantes traitées, sont effectivement susceptibles de causer, par contact et inhalation notamment, des irritations de la peau, des yeux et des voies respiratoires (Williams *et al.*, 2000). Parallèlement, des publications scientifiques mentionnent régulièrement des effets toxicologiques sévères dus au glyphosate. On l'a accusé, par exemple, d'être mutagène et génotoxique (Bolognesi *et al.*, 1997), potentiellement associé au lymphome non-hodgkinien (Hardell *et al.*, 2002), au myélome multiple (De Roos *et al.*, 2005) ou, dernière polémique en date, d'avoir des effets délétères sur les cellules placentaires humaines, ainsi qu'une action sur la synthèse des hormones sexuelles (Richard *et al.*, 2005). Selon les défenseurs du glyphosate, ces études, si elles permettent effectivement de mieux comprendre certains mécanismes de toxicité, voire d'identifier des risques potentiels liés à l'utilisation d'un produit, ne sont pas pertinentes pour estimer le risque sanitaire qu'il pose en conditions réelles d'utilisation; le plus souvent, ces dernières ne sont effectivement pas prises en compte. Ils relèvent par ailleurs que ces tests, lorsqu'ils sont appliqués à d'autres produits courants, y compris des aliments d'origine naturelle, aboutissent souvent à des résultats similaires. En fait, les dernières évaluations de risques des instances officielles européennes ont confirmé, dans le cadre des conditions d'utilisation proposées, l'innocuité des produits à base de glyphosate (European Commission, 2002). Reste que l'importance prise par cette molécule justifie une vigilance sanitaire rigoureuse. Quant aux agriculteurs, ils doivent évidemment strictement respecter les règles de sécurité et les précautions requises lors de l'utilisation de pesticides (Milon et Vernez, 2006).

Aspects environnementaux Une des caractéristiques du glyphosate est sa très forte capacité à se fixer aux particules du sol, ce qu'exprime son indice Koc(1) particulièrement élevé. Ce caractère, combiné à une dégradation microbienne relativement rapide, limite théoriquement les risques de lessivage et de contamination des eaux. C'est pourquoi, malgré sa forte solubilité, le glyphosate a été longtemps considéré comme peu dangereux pour la qualité des eaux souterraines et de surface. Mais le considérer comme un produit "amical" pour l'environnement serait exagéré, ne serait-ce que par la puissance de son effet herbicide vis à vis de la majorité des plantes. Son application, comme d'ailleurs tout désherbage, vise la flore spontanée des parcelles traitées et donc, au moins indirectement, l'ensemble des organismes écologiquement liés à cette végétation. Parallèlement, la largeur de son spectre d'efficacité impose d'être particulièrement prudent avec les risques de dérive. A son avantage, en favorisant le développement des façons culturales simplifiées, le glyphosate contribue indirectement à réduire les risques d'érosion. Cet argument est particulièrement pertinent dans les régions à sols fragiles, sujets à l'érosion, notamment éolienne. En soi, l'abandon du labour permet également de substantielles économies en énergie fossile.

(1) Koc = indice quantifiant le degré de fixation de la molécule aux particules du sol (plus l'indice est élevé, moins la molécule est mobile).

Références

- Bolognesi C., Bonatti S., Degan P., Gallerani E., Peluso M., Rabboni R., Roggieri P. & Abbondandolo A., 1997. Genotoxic activity of glyphosate and its technical formulation Roundup. *J. Agric. Food Chem.* **45**, 1957-1962.
- DeRoos A. J., Blair A., Rusiecki J. A., Hoppin J. A., Svec M., Dosemeci M., Slander D. P. & Alavanja M. C., 2005. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the agricultural health study. *Environ. Health Perspect.* **113**, 49-54.
- European Commission, 2002. Review report for the active substance glyphosate. Page Web: http://ec.europa.eu/food/fs/ph_ps/pro/eva/existing/list1_glyphosate_en.pdf
- Giesy J. P., Dobson S. & Solomon K. R., 2000. Ecotoxicological risk assessment for Roundup Herbicide. *Rev. Environ. Contamin. Toxicol.* **107**, 33-120.
- Goldstein D. A., Acquavella J. F., Mannion R.M. & Farmer D. R., 2002. An analysis of glyphosate data from the California Environmental Protection Agency pesticide illness surveillance program. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.* **40**, 885-892.
- Hardell L., Eriksson M. & Nordsrom M., 2002. Exposure to pesticides as risk factor for non-Hodgkin's lymphoma and hairy cell leukaemia: pooled analysis of two Swedish case-control studies. *Leuk. Lymphoma* **43**, 1043-1049
- Milon A. & Vernez D., 2006. Traitements phytosanitaires : évaluation des risques pour l'utilisateur. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **39**, 79-82.
- Pelfrène A., 2003. Glyphosate : toxicologie et évaluation du risque pour l'homme. *Environnement, Risques & Santé* **6**, 323-334.
- Richard S., Moslemi S., Sipahutar H., Benachour N. & Seralini G.-E., 2005. Differential effects of glyphosate and Roundup on human placental cells and aromatase. *Environmental Health Perspective* **113**, 716-720.
- Williams G. M., Kroes R. & Munro I. C., 2000. Safety evaluation and risk assessment of the herbicide Roundup and its active ingredient, glyphosate, for humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **31**, 117-165.