



Le glyphosate: bilan de la situation mondiale et analyse de quelques conséquences malherbologiques pour la Suisse

N. DELABAYS et C. BOHREN, Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, CP 1012, 1260 Nyon

@ E-mail: nicolas.delabays@acw.admin.ch
Tél. +41 (22) 36 34 444.

Résumé

Le glyphosate, un herbicide commercialisé depuis une trentaine d'années, est aujourd'hui un des principaux pesticides utilisés dans le monde. Une synthèse des expériences et des évolutions rapportées à l'échelle de la planète avec ce produit phytosanitaire est proposée, ainsi que quelques réflexions et recommandations concernant la situation en Suisse. Herbicide très efficace, le glyphosate offre un profil assez favorable sur le plan environnemental et toxicologique. Les données internationales montrent cependant que cette molécule participe aussi aux problèmes associés à un usage inconsidéré des herbicides: en particulier le développement de mauvaises herbes résistantes et la contamination des eaux superficielles. En Suisse aussi, le glyphosate est largement utilisé. En cultures spéciales, il est devenu un outil de désherbage apprécié dans les vergers et les vignes. En grandes cultures, il est un partenaire quasi obligé des méthodes culturales simplifiées et du semis direct. A ce jour, aucun cas de résistance au glyphosate n'a été rapporté en Suisse; mais les informations et expériences recueillies au niveau international justifient une grande vigilance, notamment vis-à-vis des espèces comme la vergerette du Canada (*Conyza canadensis*) (fig.1) ou les ray-grass (*Lolium sp.*). Parallèlement, les rares données helvétiques publiées relatives à la contamination des eaux superficielles par cette molécule plaident également pour une grande prudence. Aujourd'hui, seule l'utilisation raisonnée et parcimonieuse des produits à base de glyphosate, tenant compte des risques qui leur sont liés, permettra que ce précieux outil de désherbage reste, à terme, à la disposition de notre agriculture.



Fig. 1. La vergerette du Canada (*Conyza canadensis*) est la première espèce de dicotylédones à avoir développé des résistances au glyphosate au niveau mondial. Aujourd'hui, sur les 44 cas de résistance répertoriés par l'«*International survey of herbicide resistance weeds*» (Heap, 2007), 22 sont des espèces du genre *Conyza*, en majorité *C. canadensis*. Très fréquente dans notre pays, notamment dans les vignobles (Clavien et Delabays, 2006), cette espèce doit donc, avec les ray-grass (*Lolium sp.*), être particulièrement surveillée pour dépister l'apparition éventuelle d'une résistance au glyphosate.

Introduction

L'herbicide non sélectif glyphosate, commercialisé depuis une trentaine d'années, est aujourd'hui un des principaux produits phytosanitaires utilisés dans le monde. Cette situation confère à cette molécule, à l'échelle de la planète, un

statut particulier, accentué encore par son lien avec le développement des plantes transgéniques¹. Il n'est dès lors pas étonnant que le glyphosate soit au centre d'un vif débat qui porte aussi bien sur des aspects techniques et scientifiques que sur des enjeux économiques et politiques.

En Suisse aussi, cet herbicide est abondamment utilisé. Homologué pour la première fois à la fin des années septante, il figure aujourd'hui sur le marché dans plus d'une dizaine de formulations et préparations commerciales (Brex, Glyphos, Reserpan, Roundup, etc.). En cultures spéciales, il est devenu un outil de désherbage de plus en plus utilisé, notamment dans les vergers et les vignes. En grandes cultures, il est un partenaire quasi obligé des façons culturales simplifiées et du semis direct.

Certes, l'utilisation du glyphosate ne se limite pas au milieu agricole et concerne également les jardins privés, ou encore l'entretien des talus le long des routes et des voies de chemin de fer. Mais le rôle central qu'il tient en agriculture mérite une analyse critique de son utilisation par cette dernière. Sur la base d'une synthèse des expériences et des évolutions observées à l'échelle de la planète avec cet herbicide, une réflexion est proposée sur la situation en Suisse, qui aborde principalement les problèmes de développement de résistances et de contamination des eaux, deux dangers souvent associés à un usage inconsidéré des herbicides.

¹Plus de 80% des cultures transgéniques actuellement cultivées dans le monde, soit près de 85 millions d'hectares sur un total de 102 millions d'hectares, sont des plantes résistantes à un herbicide, dans la grande majorité des cas au glyphosate (ISAAA, 2006).

Un produit remarquable

Découverte, mode d'action et développement commercial

Le glyphosate, de formule moléculaire $C_2H_8NO_5P$, est appelé par les chimistes N-(phosphonométhyl)glycine (Franz *et al.*, 1997). Les propriétés herbicides de cette molécule et de ses sels ont été rapportées pour la première fois en 1971. Il s'agit d'un herbicide (presque) total, à très large spectre d'efficacité, pénétrant dans les végétaux par les feuilles, puis transporté de manière systémique dans la plante jusqu'aux racines. Il bloque la biosynthèse des acides aminés aromatiques: phénylalanine, tyrosine et tryptophane. Plus précisément, il inhibe spécifiquement un des enzymes impliqués dans la biosynthèse de ces acides aminés: l'énolpyruvylshikimate phosphate synthétase (EPSPS). En bloquant cette étape de la voie métabolique, l'herbicide induit une accumulation d'acide shikimique et une carence en énolpyruvylshikimate phosphate. Il en résulte, notamment, une interruption de la production des protéines, qui entraîne la mort de la plante traitée.

Les premières formulations commerciales de cet herbicide sont introduites en 1974. Depuis, et même en l'absence de données précises, il est évident que l'utilisation de cette matière active n'a cessé de croître. A la fin des années nonante, alors que des brevets protégeaient encore la molécule et que les cultures transgéniques commençaient juste à se développer, le volume de glyphosate utilisé par l'agriculture à l'échelle de la planète était déjà estimé à plus de 74 000 tonnes (Woodburn, 2000).

Ce succès s'explique d'abord par la remarquable efficacité de cet herbicide. En cultures spéciales, il a contribué au développement de la non-culture du sol, offrant une souplesse appréciable pour maîtriser la flore spontanée de ces parcelles. En grandes cultures, il facilite l'adoption du non-labour et du semis direct. Au niveau mondial, comme déjà relevé précédemment, son développement est intimement lié à celui des cultures transgéniques.

Profil toxicologique et environnemental «favorable», mais vigoureusement controversé

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. A titre d'illustration, le tableau 1 rassemble quelques-unes des caractéristiques du glyphosate et de l'ensemble des autres molécules homologuées en Suisse pour le désherbage de la vigne.

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

Tableau 1. Quelques caractéristiques, déterminantes pour l'analyse des risques éco-toxicologiques, des matières actives herbicides homologuées en Suisse pour la viticulture. En vert: indice le plus favorable; en rouge: indice le plus critique.

Herbicides	Glyphosate (Roundup)	Glufosinate (Basta)	Flazasulfuron (Chikara)	Diuron (Valor)	Simazine (Gesatop)	Flumioxazine (Pledge)	Linuron (Afalon)	Oryzaline (Surflan)	Terbutylazine (Alice)
Dosage/ha	3300 g/ha	1000 g/ha	50 g/ha	2000 g/ha	1000 g/ha	500 g/ha	2250 g/ha	3800 g/ha	1400 g/ha
Demi-vie (sol)	1-2 mois	1 semaine	10-20 jours	3 mois	2 mois	10-30 jours	2-3 mois	1-4 mois	3-6 mois
Solubilité H ₂ O	900 g/l	1370 g/l	2 g/l	0,04 g/l	0,005 g/l	0,002 g/l	0,075 g/l	0,003 g/l	0,008 g/l
K _{oc} (fixation sol)	24 000 ml/g	100 ml/g	150 ml/g	480 ml/g	130 ml/g	1000 ml/g	400 ml/g	600 ml/g	310 ml/g
CL ₅₀ Poisson	26 mg/l	> 320 mg/l	22 mg/l	6 mg/l	70 mg/l	2,9 mg/l	16 mg/l	3,3 mg/l	80 mg/l
DL ₅₀ Rat	5600 mg/kg	2200 mg/kg	5000 mg/kg	3400 mg/kg	> 5000 mg/kg	> 5000 mg/kg	1200 mg/kg	5000 mg/kg	4800 mg/kg

Dosage/ha = dose maximale homologuée; Demi-vie sol = temps nécessaire à la dégradation de la moitié de la quantité d'herbicide présente dans le sol; K_{oc} = indice quantifiant le degré de fixation de la molécule aux particules du sol (plus l'indice est élevé, moins la molécule est mobile); Solubilité H₂O = solubilité de la molécule dans l'eau (plus la solubilité est élevée, plus les risques de lessivages sont importants); CL₅₀ = concentration provoquant 50% de mortalité; DL₅₀ = dose provoquant 50% de mortalité (Sources: WSSA, 1994).

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 formulations² 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).

²Un produit phytosanitaire, outre la matière active proprement dite, contient également d'autres composés, destinés par exemple à améliorer sa stabilité, sa manipulation ou son efficacité.

Aspects environnementaux

Une des caractéristiques du glyphosate est sa très forte capacité à se fixer aux particules du sol, ce qu'exprime son indice K_{oc} particulièrement élevé (tabl.1). 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 «amicale» pour l'environnement serait exagéré³, 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.

Toute médaille a son revers...

Le développement et l'utilisation croissante des herbicides ces dernières décennies ont grandement facilité la gestion de la flore spontanée présente dans les parcelles cultivées. Cependant, si l'intérêt des herbicides est évident pour la majorité des agriculteurs, leur utilisation généralisée génère des problèmes d'acuité croissante, notamment le développement de résistances (Delabays *et al.*, 2004) et la contamination des eaux (Muralt *et al.*, 2005).

Développement des résistances au glyphosate

Bilan de la situation mondiale

Il y a juste dix ans, Bradshaw *et al.* (1997), considérant les particularités de cet herbicide (structure chimique, mode d'action, faible métabolisation dans les végétaux, absence d'activité résiduaire au niveau du sol, aucun cas de résis-

tance répertorié après plus de vingt ans d'utilisation, etc.), écrivaient: «*La probabilité d'un développement d'une résistance au glyphosate paraît faible.*» Pourtant, dès 1996, un ray-grass (*Lolium rigidum*) résistant avait été détecté en Australie (Powles *et al.*, 1998). Puis d'autres biotypes de *L. rigidum* résistants au glyphosate ont été identifiés dans ce même pays, en Californie, en Afrique du Sud et plus récemment en France (Heap, 2007). Dès 1997, une autre graminée résistante au glyphosate, un biotype d'*Eleusine indica*, a été décrite en Malaisie (Bearson *et al.*, 2002). Par la suite, une autre espèce de ray-grass, *Lolium multiflorum*, a également développé des biotypes résistants au Chili, au Brésil et aux Etats-Unis. Enfin, un cas de résistance chez le sorgho d'Alep (*Sorghum halepense*) est mentionné en Argentine dès 2005 (Heap, 2007). Concernant les dicotylédones, le cas d'une vergerette (*Conyza canadensis*) résistante au glyphosate a été rapporté pour la première fois en 2001, dans une parcelle de l'Etat du Delaware (USA) cultivée avec du soja transgénique «*RoundupReady*» depuis trois ans (VanGessel, 2001). De nombreux autres biotypes ont été répertoriés depuis, dans différents Etats des Etats-Unis, au Brésil et en Chine (Heap, 2007). Parallèlement, une autre espèce de conyze, *C. bonariensis*, a également développé des résistances au glyphosate en Afrique du Sud, en Espagne et au Brésil. Aujourd'hui, sur les 44 cas de résistance répertoriés par l'*International survey of herbicide resistant weeds* (ISHR), 22 concernent des biotypes du genre *Conyza*, surtout *C. canadensis* (Heap, 2007). Les autres dicotylédones concernées sont des amarantes (*Amaranthus palmeri* et *A. rudis*), des ambrosies (*Ambrosia artemisiifolia* et *A. trifida*), une euphorbe (*Euphorbia heterophylla*) et un plantain (*Plantago lanceolata*). Au total, 12 espèces de mauvaises herbes ont donc développé des biotypes résistants au glyphosate. La figure 2 dresse la carte mondiale de ces résistances, telles qu'elles sont répertoriées à ce jour dans la banque de données de l'ISHR, montrant clairement que tous les continents sont maintenant concernés. Elle indique également que les cas de résistance ne sont pas liés uniquement au développement des cultures transgéniques. Au

³La firme Monsanto a été attaquée en justice à plusieurs reprises, notamment aux Etats-Unis et en France, pour avoir présenté le glyphosate comme étant «respectueux de l'environnement» («*environmentally friendly*»). Dans tous les cas, elle a dû retirer les annonces litigieuses.

Mauvaises herbes résistantes au glyphosate: situation mondiale au printemps 2007

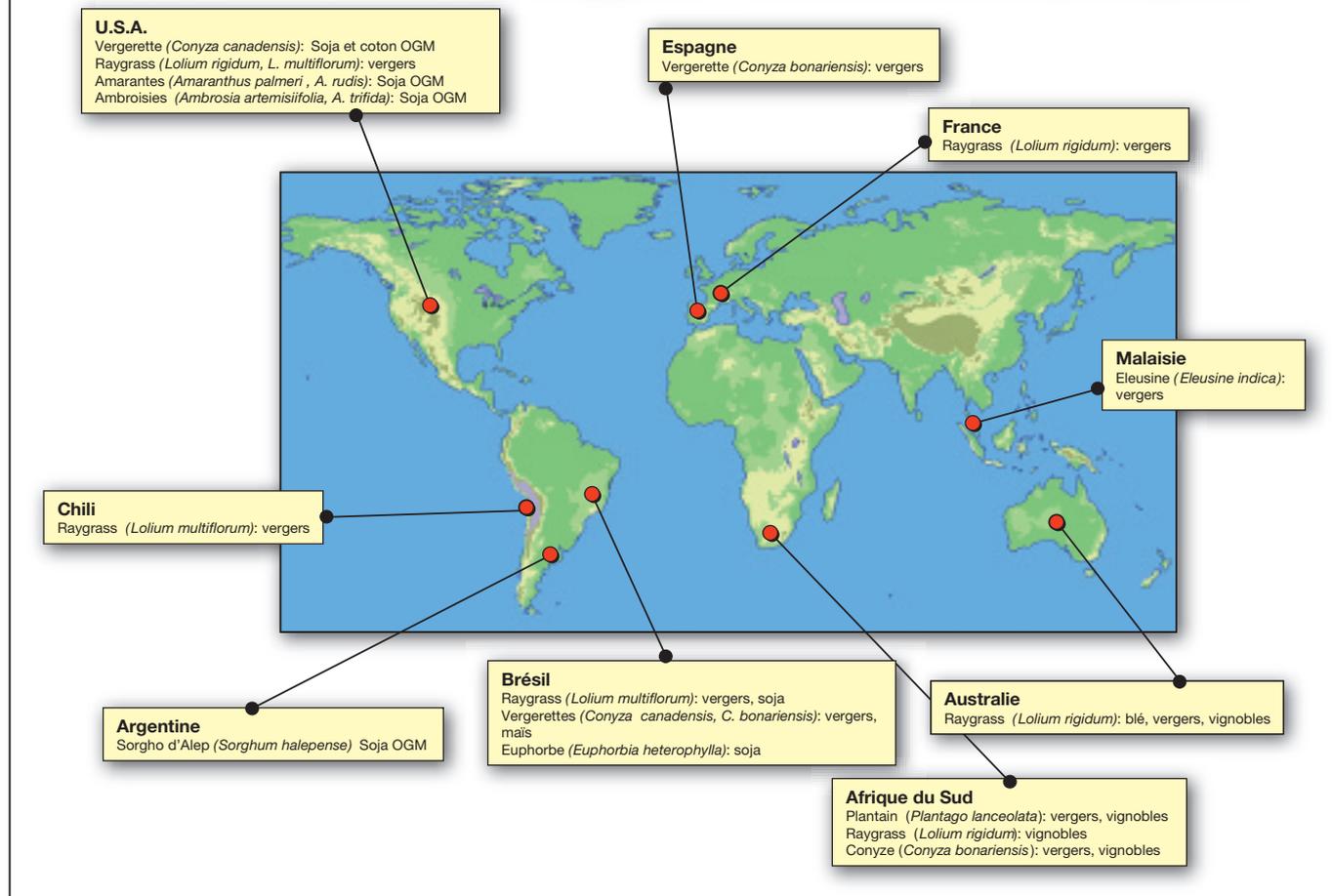


Fig. 2. Carte de répartition mondiale des cas de résistance au glyphosate répertoriés par l'«*International survey of herbicide resistance weeds*» et types de cultures concernés (Heap, 2007).

contraire, une bonne part des biotypes résistants se sont développés dans des cultures conventionnelles, principalement des vergers et des vignobles.

Différents mécanismes

Ces résistances résultent de différents mécanismes développés par les plantes concernées (Powles et Preston, 2006). Ainsi, dans le cas du premier biotype d'éleusine (*Eleusine indica*), des études effectuées au niveau moléculaire ont montré que la séquence d'acides aminés de l'EPSP synthétase, l'enzyme-cible du glyphosate, était modifiée, avec comme conséquence que son affinité vis-à-vis de l'herbicide était cinq fois moindre que chez les plantes sensibles (Bearson *et al.*, 2002). Cette modification de l'enzyme-cible résulte d'une mutation du gène codant l'enzyme (substitution d'une proline par une sérine). Par la suite, d'autres biotypes d'éleusine résistants ont montré qu'une substitution de la même proline par une thréonine aboutissait également à une perte d'efficacité du glyphosate (Ng *et al.*, 2005). Le même type de mu-

tation a également été détecté chez des biotypes de ray-grass résistants, notamment en Australie et au Chili (Powles et Preston, 2006). Parallèlement, un mécanisme de résistance différent a été mis en évidence chez d'autres biotypes de ray-grass (*Lolium rigidum*) d'Australie: dans ces populations, c'est le transport du glyphosate à l'intérieur de la plante qui est modifié. Normalement, après un traitement foliaire, l'herbicide est transporté prioritairement vers la base de la plante et dans les racines. Or, chez ces biotypes résistants, le glyphosate se concentre principalement à l'extrémité supérieure des feuilles traitées (Lorraine-Colwill *et al.*, 2002; Wakelin *et al.*, 2004). Enfin, pour d'autres populations de ray-grass, un ou des mécanismes encore à déterminer sont apparemment en cause (Feng *et al.*, 1999; Perez *et al.*, 2004; Simarmata *et al.*, 2003). Chez les dicotylédones, plusieurs populations de vergerette du Canada (*Coryza canadensis*) résistants ont également été étudiées pour déterminer le mécanisme de la perte d'efficacité de l'herbicide. Chez ces plantes, l'enzyme

cible n'a pas subi de mutation et reste sensible à l'herbicide (Koger *et al.*, 2005). Par contre, comme chez certaines des populations de *Lolium* résistants, son transport vers les racines est diminué, avec une tendance à l'accumulation de l'herbicide au niveau des feuilles traitées (Feng *et al.*, 2004; Koger et Reddy, 2005).

Ce mécanisme de résistance lié au transport de l'herbicide dans la plante soulève des questions intéressantes. En effet, chez les adventices, la très grande majorité des cas de résistance aux herbicides répertoriés à ce jour découle soit d'une mutation de l'enzyme cible, soit d'une métabolisation accélérée de l'herbicide par la plante. Le mécanisme original de la résistance au glyphosate décrit chez la vergerette du Canada et plusieurs populations de ray-grass mérite donc une attention particulière. Sa base moléculaire et biochimique reste inconnue, mais les premières études génétiques indiquent un déterminisme basé sur un gène nucléaire unique, avec une dominance partielle (Lorraine-Colwill *et al.*, 2002; Zelaya *et al.*, 2005).

Et en Suisse?

A ce jour, aucun cas de résistance au glyphosate n'est rapporté en Suisse. Cependant, les observations rassemblées à l'échelle mondiale et l'importance prise par cet herbicide dans notre pays justifient une certaine prudence et une grande vigilance. La prudence consiste à respecter les règles de base permettant de limiter le développement et la dissémination des adventices résistantes aux herbicides: diversifier les méthodes de désherbage et/ou d'entretien du sol (travail mécanique, couverture organique, enherbement, etc.) et, pour la lutte chimique, alterner les matières actives utilisées dans une parcelle (Delabays *et al.*, 2004). Sur ce dernier point, on ne peut que s'inquiéter de la réduction régulière de la palette d'herbicides disponibles pour de nombreuses cultures. Cette réduction provient du faible développement de nouvelles matières actives (constat d'ailleurs valable pour tous les types de produits phytosanitaires), couplé aux retraits réguliers d'anciennes molécules, et des nombreuses limitations imposées: production intégrée, prestations écologiques requises, labels, etc.

La vigilance consiste à bien observer le comportement de la flore des parcelles cultivées vis-à-vis des traitements. Il s'agit de repérer rapidement toute perte d'efficacité de l'herbicide sur des espèces préalablement correctement maîtrisées⁴. Avec le glyphosate, l'analyse de la situation mondiale montre que ce sont souvent dans les cultures spéciales, notamment des vignes ou des vergers, que les premiers cas de résistance apparaissent. Le rôle joué par cette matière active dans nos cultures fruitières et nos vignobles incite donc à une attention particulière dans ces parcelles. Rappelons que sur les 44 biotypes répertoriés à ce jour dans la banque de données de Heap (2007), 22 sont des biotypes du genre *Conyza*, principalement la vergerette du Canada (*Conyza canadensis*) (fig. 1). Une surveillance spéciale se justifie donc vis-à-vis de cette plante, l'une des principales espèces répertoriées dans l'inventaire de la flore des vignobles de Suisse romande (Clavien et Delabays, 2006). Les autres espèces à suivre sont bien sûr les ray-grass (*Lolium sp.*).

⁴Bien que qualifié d'herbicide «total», le glyphosate peut avoir une efficacité très variable selon les espèces. Par exemple, le li-seron (*Convolvulus arvensis*), les épilobes (*Epilobium sp.*) ou encore certaines légumineuses sont souvent peu ou mal maîtrisés par cet herbicide. Dans ces cas, il ne s'agit pas de résistance à proprement parler, mais une utilisation trop systématique du glyphosate peut favoriser le développement de ces espèces dans certaines parcelles.

Pollution des eaux: des indices inquiétants

Comme on l'a dit, les risques de contamination des eaux par le glyphosate ont longtemps été considérés comme faibles. Ce jugement, auquel s'ajoute l'analyse techniquement assez difficile de la molécule, explique le peu de suivi consacré à cette substance, en dépit de sa très large utilisation. Par exemple, la campagne nationale de contrôle de la qualité des eaux souterraines réalisée en Suisse en 2002-2003 n'a pas pris en compte le glyphosate (Muralt *et al.*, 2005). Pourtant, des rapports annonçant la présence, dans les eaux de surface notamment, de glyphosate et de son principal métabolite, l'AMPA⁵, se sont multipliés ces dernières années dans différents pays européens. En France, par exemple, le dernier rapport de l'Institut français de l'environnement (Ifen), qui présente les résultats des campagnes d'analyse de 2003 et 2004, mentionne que le glyphosate et l'AMPA figurent parmi les principaux polluants des eaux de surface (Nirascou, 2006). En 2003, l'AMPA est détecté dans

⁵L'AMPA (acide aminométhylphosphonique) est le premier produit de dégradation du glyphosate, mais il est également utilisé comme additif dans certains détergents, notamment les produits destinés aux machines à laver la vaisselle. Les résidus retrouvés dans les eaux peuvent donc avoir également une origine autre que l'herbicide. Sa présence souvent associée au glyphosate, de même que sa détection dans des bassins versants peu urbanisés, ne permettent cependant pas d'exclure la responsabilité de l'agriculture.

59% et le glyphosate dans 33% des échantillons. En 2004, ces chiffres sont de respectivement 55 et 35%. Ces observations ont certainement joué un rôle dans la décision prise en France, dès 2004, de limiter l'application de cette molécule: réduction des doses maximales de glyphosate autorisées, étiquetage contraignant, etc. En vignes, les doses maximales de glyphosate (matière active) utilisables en traitements de surface sont maintenant limitées à 2160 g m.a., par hectare et par année!

Les données suisses restent peu nombreuses. Une petite série d'échantillons d'eau prélevés par la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL) en juillet 2004, dans le lac Léman et dans quelques rivières romandes (tabl. 2), a donné les résultats suivants: absent du lac, le glyphosate est par contre détecté dans la majorité des échantillons prélevés dans les rivières, le plus souvent à des dosages élevés, supérieurs aux normes légales (Corvi *et al.*, 2005). Malgré l'échantillonnage très restreint, ces résultats concordent avec les données étrangères, en particulier françaises, et plaident pour une surveillance accrue dans notre pays également.

Les impacts écologiques réels de ces résidus peuvent bien sûr être discutés, mais il est clair que les exigences de la population concernant la qualité de nos eaux sont de plus en plus élevées. L'agriculture, si elle veut conserver l'usage de ce précieux outil de désherbage, a tout intérêt à prendre en compte ces aspects et à l'utiliser de manière raisonnée et parcimonieuse.

Tableau 2. Résidus en glyphosate et en AMPA détectés dans une série d'échantillons d'eau prélevés en juillet 2004 dans le lac Léman et des cours d'eau romands. La norme légale tolérée s'élève à 0,1 µg/l (données CIPEL).

Lac/rivière	Lieux	Glyphosate	AMPA
Léman	2,5 m	< 0,1 µg/l	< 0,1 µg/l
Léman	10 m	< 0,1 µg/l	< 0,1 µg/l
Signèse	Sierre	< 0,1 µg/l	< 0,1 µg/l
Canal de la Plaine	Vétroz	0,19 µg/l	< 0,1 µg/l
Venoge	Ecublens	0,12 µg/l	0,12 µg/l
Boiron	Morges	0,19 µg/l	0,14 µg/l
Charmilles (ruisseau)	Dardagny	2,80 µg/l	3,94 µg/l
Marais (ruisseau)	Veyrier	0,75 µg/l	0,23 µg/l
Hermance	Hermance	< 0,1 µg/l	< 0,1 µg/l
Foron	Nernier	0,25 µg/l	0,15 µg/l

Conclusions

- Le glyphosate est un herbicide très efficace, largement utilisé par l'agriculture suisse, les jardins privés et pour l'entretien des talus le long des voies de communications (routes nationales et cantonales, voies de chemin de fer).
- Par rapport à d'autres produits phytosanitaires, son profil environnemental et toxicologique est relativement favorable. Son efficacité et l'ampleur des quantités utilisées justifient cependant que ce produit soit soumis à une surveillance sanitaire et environnementale particulièrement rigoureuse.
- Ce produit exige notamment un strict respect des règles de sécurité et des conditions d'application: protection des utilisateurs, gestion des fonds de cuves, limitation maximale des risques de dérive, respect des dosages et des distances de sécurité.
- Les données internationales montrent que le développement de mauvaises herbes résistantes au glyphosate est une réalité. Même si aucun cas de résistance n'est encore signalé dans notre pays, une stratégie de prévention se justifie: alternance des techniques de désherbage et des matières actives utilisées, surveillance de la réponse de la flore aux traitements, etc.
- Les données internationales et les quelques résultats obtenus en Suisse indiquent clairement que le glyphosate est un polluant potentiel des eaux superficielles.
- Une utilisation raisonnée des produits à base de glyphosate, tenant compte des risques qui leur sont liés, est la meilleure garantie que ce précieux outil de désherbage reste, à terme, pleinement à disposition de notre agriculture.

Bibliographie

- Bearson S. R., Rodriguez D. J., Tran M., Feng Y., Best N. A. & Dill G. M., 2002. Glyphosate-resistant goosgrass: identification of a mutation in the target enzyme 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase. *Plant Physiol.* **129**, 1265-1275.
- 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.
- Bradshaw L. D., Padgett S. R., Kimball S. L. & Wells B. H., 1997. Perspectives on glyphosate resistance. *Weed Technology* **11**, 189-198.

- Clavien Y. & Delabays N., 2006. Inventaire floristique des vignes de Suisse romande: connaître la flore pour mieux la gérer. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **38**, 335-341.
- Corvi C., Zimmerli P., Ortelil D., Khim-Heang S. & Becker Van Slooten K., 2005. Métaux et micropolluants organiques dans les eaux, les moules et les poissons du Léman. In: Rapp. Comm. Int. Prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2004, 55-78.
- Delabays N., Mermillod G. & Bohren C., 2004. Mauvaises herbes résistantes aux herbicides en Suisse: passé, présent,.... futur? *Revue suisse Agric.* **36**, 149-154.
- 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: ec.europa.eu/food/fs/ph_ps/pro/eva/existing/list1_glyphosate_en.pdf - accès le 15 avril 2007.
- Feng P. C. C., Pratley J. E. & Bohn J. A., 1999. Resistance to glyphosate in *Lolium rigidum* II: uptake, translocation and metabolism. *Weed Sci.* **47**, 412-415.
- Feng P. C. C., Tran M., Chiu T., Sammons R. D., Heck G. R. & Jacob C. A., 2004. Investigation into glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*): retention, uptake, translocation and metabolism. *Weed Sci.* **52**, 498-505.
- Franz J. E., Mao M. K. & Sikorski J. A., 1997. Glyphosate: a unique global herbicide. ACS Monograph 189, Am. Chem. Soc., Washington, 163-175.
- 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.
- Heap I., 2007. The international survey of herbicide resistant weeds. Page Web: www.weed-science.org. Accès le 15 avril 2007.
- ISAAA, 2006. International Service for the Acquisition of Agro-biotech Applications. Page Web: www.isaaa.org. Accès le 15 avril 2007.
- Koger C. H., Shaner D. L., Henry W. B., Nadler-Hassar T., Thomas W. E. & Wilcut J. W., 2005. Assessment of two non-destructive assays for detecting glyphosate resistance in horseweed (*Conyza canadensis*). *Weed Sci.* **53**, 438-445.
- Koger C. H. & Reddy K. N., 2005. Role of absorption and translocation in the mechanism of glyphosate resistance in horseweed (*Conyza canadensis*). *Weed Sci.* **53**, 84-89.
- Lorraine-Colwill D. F., Powles S. B., Hawkes T. R., Hollinshead P. H., Warner S. A. J. & Preston C., 2002. Investigation into the mechanism of glyphosate resistance in *Lolium rigidum*. *Pestic. Biochem. Physiol.* **74**, 62-72.
- Milon A. & Vernez D., 2006. Traitements phytosanitaires: évaluation des risques pour l'utilisateur. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **39**, 79-82.
- Muralt R., Kilchmann S., Guhl F., Cornaz S., Herold T., Clavien D. & Kozel B., 2005. NAQUA. *Qualité des eaux souterraines en Suisse 2002/2003*. Office fédéral de l'environnement, Berne, 206 p.
- Ng C. H., Wickneswary R., Salmijah S., Teng Y. T. & Ismail B. S., 2005. Glyphosate resistance in *Eleusine indica* from different origins and polymerase chain reaction amplification of specific alleles. *Aus. J. Agric. Res.* **55**, 407-414.
- Nirascou F., 2006. Les pesticides dans les eaux, Données 2003 et 2004. Les Dossiers IFEN, Institut français de l'environnement, N° 5, 38 p.
- Pelfrène A., 2003. Glyphosate: toxicologie et évaluation du risque pour l'homme. *Environnement, Risques & Santé* **6**, 323-334.
- Perez A., Allister C. & Kogan M., 2004. Absorption, translocation and allocation of glyphosate in resistant and susceptible Chilean biotypes of *Lolium multiflorum*. *Weed Biol. Manag.* **4**, 56-58.
- Powles S. B., Lorraine-Colwill D. F., Dellow J. J. & Preston C., 1998. Evolved resistance to glyphosate in rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in Australia. *Weed Sci.* **46**, 604-607.
- Powles S. B. & Preston C., 2006. Evolved glyphosate resistance in plants: biochemical and genetic basis of resistance. *Weed Technology* **20**, 282-289.
- 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.
- Simarmata M., Kaufmann J. E. & Penner D., 2003. Potential basis of glyphosate resistance in California rigid ryegrass (*Lolium rigidum*). *Weed Sci.* **51**, 678-682.
- VanGessel, M. J., 2001. Glyphosate-resistant horseweed from Delaware. *Weed Sci.* **49**, 703-705.

Zusammenfassung

Glyphosate: weltweit hoher Verbrauch und Bildung von Unkrautresistenzen beeinflussen die Anwendung des in der Schweiz meistgebrauchten Herbizids

Glyphosate wird seit über 30 Jahren in vielen Ländern als Herbizid vermarktet und ist weltweit eines der am meisten verwendeten Pestizide. Dieser Artikel beleuchtet Erfahrungen und Auswirkungen des weltweiten Glyphosate Einsatzes. Eingeflochten sind Überlegungen zur Anwendung von Glyphosate in der Schweiz. Das hochwirksame Glyphosate profitiert von einem günstigen Umweltprofil. Internationale Daten zeigen jedoch, dass auch dieses Herbizid Wirkungsresistenzen hervorrufen und Oberflächengewässer verunreinigen kann. Auch in der Schweiz ist der Glyphosate-Verbrauch sehr hoch. In Spezialkulturen, Obst- und Weinbau ist es ein verbreitet eingesetztes Herbizid, im Ackerbau ein obligater Begleiter von Direktsaaten. Bisher wurden in der Schweiz noch keine Resistenzen verzeichnet. Kanadisches Berufskraut (*Conyza canadensis* L.) oder Raigräser (*Lolium* sp.) müssen aber sehr genau beobachtet werden. Parallel dazu erregen die im Genferseebecken erhobenen Daten zur Verunreinigung von Oberflächengewässern mit Glyphosate grosse Besorgnis. In der Schweiz wie weltweit ist der sparsame und vernünftige Umgang mit Glyphosate die einzige Garantie, dass dieses hilfreiche Herbizid trotz Resistenzen und Umweltprobleme weiterhin der Landwirtschaft zur Verfügung steht.

- Wakelin A. M., Lorraine-Colwill D. F. & Preston C., 2004. Glyphosate resistance in four different populations of *Lolium rigidum* is associated with reduced translocation of glyphosate to meristematic zones. *Weed Res.* **44**, 453-459.
- 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.
- Woodburn A. T., 2000. Glyphosate: production, pricing and use worldwide. *Pest Management Science* **56**, 309-312.
- WSSA, 1994. Herbicide handbook. 7th edition, Weed Science Society of America, Champaign, 352 p.
- Zelaya I. A., Owen M. D. K. & Van Gessel M. J., 2005. Inheritance of evolved glyphosate resistance in *Conyza Canadensis* (L.) Cronq. *Theor. Appl. Genet.* **110**, 58-70.

Summary

Glyphosate: worldwide situation and consequences for Switzerland

Glyphosate-based weed control products are among the most widely used pesticides in the world. This paper reviews experiments and observations reported worldwide with this herbicide, as well as some recommendations regarding its use in Switzerland. Highly efficient against weeds, glyphosate has a relatively favourable toxicological and environmental profile. Nevertheless, numerous data clearly indicate that its use may promote resistant weeds development, and also contaminate surface water, especially rivers. In Switzerland too, glyphosate is now largely used in agriculture. Even though no case of resistance to glyphosate has been reported so far, user experience gathered worldwide dictates that we keep alert, especially with *Conyza* and *Lolium* species. Moreover, the rare data available in Switzerland about surface water contamination with glyphosate plead for a more careful use of this molecule.

Key words: glyphosate, weed control, Switzerland.

Riassunto

Il glifosate: bilancio della situazione mondiale e qualche conseguenza malerologica per la Svizzera

Il presente articolo propone una sintesi delle esperienze e delle evoluzioni rapportate su scala planetaria con il glifosate, un erbicida commercializzato da una trentina di anni e che figura oggi tra i principali pesticidi utilizzati nel mondo, e presenta pure qualche riflessione e raccomandazione concernente la situazione elvetica. Erbicida molto efficace, il glifosate beneficia peraltro di un profilo ambientale e tossicologico relativamente favorevole. I dati internazionali mostrano tuttavia che questa molecola non è al riparo da pericoli sovente associati ad un uso sconsiderato degli erbicidi; particolarmente lo sviluppo di malerbe resistenti e la contaminazione delle acque di superficiali. Il

glifosate è abbondantemente utilizzato anche in Svizzera. Nelle colture speciali, è diventato uno strumento di diserbo importante e apprezzato nei frutteti e vigneti. In campicoltura, rappresenta un partner quasi obbligatorio dei sistemi colturali semplificati e della semina diretta. Fino ad oggi, nessun caso di resistenza al glifosate è riportato in Svizzera, ma un'attenta vigilanza è giustificata particolarmente per quel che concerne specie come l'erigero (*Conyza canadensis*) o il loietto (*Lolium sp.*). Parallelamente, i rari dati elvetic pubblicati relativi alla contaminazione delle acque superficiali da questa molecola, raccomandano ugualmente una grande prudenza. Globalmente, un uso razionale e parsimonioso dei prodotti a base di glifosate, che tenga conto dei rischi che gli sono legati, è la migliore garanzia affinché questo prezioso strumento di diserbo resti, a termine, a disposizione della nostra agricoltura.