

ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX CHANGEMENTS DES PRATIQUES DE DESHERBAGE DANS UN CONTEXTE D'INTRODUCTION DE PLANTES GÉNÉTIQUEMENT MODIFIÉES RÉSISTANTES À DES HERBICIDES À LARGE SPECTRE (CAS DU GLYPHOSATE) : CONSÉQUENCES SUR LA CONTAMINATION DU MILIEU PAR LES HERBICIDES

SOIL BEHAVIOUR OF HERBICIDES AND EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PESTICIDES WHEN INTRODUCING THE GLYPHOSATE-RESISTANT CROPS

L. MAMY, E. BARRIUSO

UMR INRA INA P-G Environnement et Grandes Cultures, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon

RESUME

Le comportement du glyphosate dans le sol a été comparé à celui d'autres herbicides classiquement utilisés en cultures susceptibles d'être génétiquement modifiées (GM) pour les rendre résistantes au glyphosate (atrazine pour le maïs, métamitron pour la betterave et trifluraline pour le colza). Les sols utilisés proviennent des plates-formes inter-instituts des essais OGM. Le glyphosate est l'herbicide le plus fortement retenu, donc celui qui présente le plus faible potentiel de mobilité en

solution. Sa rétention dépend de certains facteurs pédologiques comme la teneur en cuivre, en hydroxydes de fer et en phosphate. Le glyphosate se dégrade rapidement dans les sols, mais la durée de demi-vie est très différente en fonction des sols : l'augmentation de l'adsorption provoque un ralentissement de la dégradation. Les résultats obtenus sont utilisés pour faire une estimation comparative entre les différents herbicides des risques de contamination des sols et des eaux.

SUMMARY

Glyphosate behaviour in soil was compared with that of other herbicides frequently used in corn (atrazine), rape (trifluralin) and sugarbeet (metamitron). These crops might be genetically modified (GM) to make them glyphosate-resistant. Soils used in this study came from French inter-institutes platforms of GM plant attempts. Glyphosate was the most strongly adsorbed herbicide, presenting the weakest potential of mobility in soil. Glyphosate

retention depended on some pedological factors like copper, iron hydroxides and phosphate content. Glyphosate degradation readily occurred in soils, but half-lives were very different according to soils: increase in adsorption reduced degradation. Results were used to run a pesticide model PRZM to evaluate and to compare predicted levels of soils and waters contamination by the different herbicides.

INTRODUCTION

L'introduction des plantes GM résistantes à des herbicides à large spectre, en particulier au glyphosate, constitue une réponse technique à des contraintes de désherbage de certaines cultures (colza, maïs et betterave, par exemple). En théorie, cette technique permet une réduction des quantités totales d'herbicides (de 20 à 85 % selon différents scénarios), avec une réduction du nombre des matières actives, et donc de la diversité des polluants potentiels. Le désherbage des cultures GM est relativement moins technique, permettant une plus grande souplesse pour les agriculteurs. En outre, les herbicides envisagés, en particulier le glyphosate, sont censés avoir un moindre impact écotoxicologique comparés aux herbicides couramment utilisés, en particulier, vis-à-vis des écosystèmes aquatiques. Dans ce sens, l'introduction des plantes GM peut être envisagée comme une stratégie de protection de la qualité des eaux et de réduction de leur contamination par des herbicides couramment retrouvés lors des campagnes de surveillance. Néanmoins, l'augmentation concomitante des surfaces traitées laisse présager une augmentation des teneurs en glyphosate dans les eaux, augmentation aggravée par le développement des utilisations agricoles hors contexte OGM et non agricoles de cet herbicide.

L'objectif de ce travail est d'effectuer une évaluation comparative du comportement environnemental du glyphosate, utilisé dans un contexte d'introduction de plantes GM, par rapport à d'autres herbicides utilisés lors des pratiques de désherbage classiques de ces mêmes cultures mais non GM. Il s'agit d'intégrer des observations sur le comportement des herbicides et leur dispersion dans les différents compartiments de l'environnement pour pouvoir faire une évaluation globale des impacts environnementaux d'un itinéraire technique (culture GM vs non GM). Pour ce faire, une estimation comparative des risques de mobilité et de persistance des différents herbicides sera faite à partir de données de rétention et de dégradation dans les sols.

MATERIELS ET METHODES

Trois sols représentatifs des plates-formes OGM inter-instituts (CETIOM, ITB, AGPM) de Champagne (Châlons), Bourgogne (Dijon) et Midi-Pyrénées (Toulouse) ont été prélevés sur une profondeur de 10 cm. Le sol de Châlons est calcaire et riche en matière organique, celui de Dijon argilo-calcaire et celui de Toulouse sablo-limoneux avec un pH de 6.3.

La rétention des herbicides par les sols a été caractérisée au laboratoire par les isothermes d'adsorption et de désorption correspondantes. Après l'adsorption des herbicides sur les sols, cinq désorptions successives ont été réalisées pour chaque échantillon.

La dégradation des herbicides a été étudiée en conditions contrôlées de laboratoire (humidité équivalente à 85 % de la capacité de rétention en eau, 28°C, à l'obscurité) en utilisant des herbicides marqués au ^{14}C avec une dose d'application (1 mg kg^{-1}) correspondant à des doses agronomiques. Au cours des incubations, le dégagement de $^{14}\text{CO}_2$ permet de suivre les cinétiques de minéralisation des herbicides et des extractions séquentielles ($1 \times \text{CaCl}_2 \text{ } 0.01\text{M} + 3 \times \text{NH}_4\text{OH } 0.5\text{M}$ pour le glyphosate, $1 \times \text{CaCl}_2 \text{ } 0.01\text{M} + 3 \times \text{CH}_3\text{OH}$ pour la métamitronne et la trifluraline) ont permis de caractériser l'évolution de la disponibilité des herbicides, les vitesses de dégradation et les cinétiques de formation des résidus liés. Par ailleurs, les dispositifs d'incubation contenant de la trifluraline, composé ayant une pression de vapeur élevée, sont surmontés d'un bouchon en laine de verre imbibée de paraffine pour piéger la trifluraline volatilisée.

Les données obtenues au laboratoire sur la rétention et la dégradation ont été utilisées comme paramètres d'entrée pour calculer un index de risque de lixiviation (GUS) et pour mettre en œuvre un modèle de simulation "Pesticide Root Zone Model" (PRZM) avec des scénarios pédo-climatiques retenus par le groupe européen d'évaluation Focus.

RESULTATS ET DISCUSSION

Rétention des herbicides par les sols

Les isothermes d'adsorption ont été linéarisées pour permettre le calcul d'un coefficient de distribution K_d ($K_d = Q_{ads}/C_e$; où Q_{ads} est la quantité d'herbicide adsorbé et C_e est la concentration d'herbicide dans la solution). La normalisation du K_d par rapport à la teneur en carbone organique (% Corg) des sols permet de calculer les K_{oc} ($K_{oc} = K_d \cdot 100 / \% \text{Corg}$).

Le glyphosate est l'herbicide le plus retenu dans les sols étudiés, son adsorption est comparable à celle de la trifluraline (*Tableau 1*). L'adsorption du glyphosate diminue dans le sens Toulouse > Dijon > Châlons. Les valeurs de Kd sont conformes à celles que l'on trouve dans la littérature (Sprankle *et al.*, 1975 a & b ; Hance, 1976 ; Glass, 1987 ; Gerritse *et al.*, 1996). En revanche, l'adsorption de la trifluraline décroît dans le sens Châlons > Dijon > Toulouse.

Tableau 1 : Coefficients de distribution, quantités d'herbicide désorbé après 5 désorptions

HERBICIDE	Kd (l/kg)			Koc (l/kg)			Herbicide désorbé (% Qadsorbée)
Glyphosate	33(C)	49(D)	472(T)	1800(C)	3633(D)	46922(T)	3(T) 22(D) 23(C)
Atrazine	1.0(D)	1.5(T)	1.6(C)	80(D)	89(C)	156(T)	62(T) 67(C) 68(D)
Métamitronne	0.88(T)	1.0(D)	1.2(C)	68(C)	75(D)	87(T)	62(C) 73(T) 78(D)
Trifluraline	33(T)	36(D)	38(C)	2041(C)	2724(D)	3314(T)	12(C) 17(D) 18(T)

C = Châlons ; D = Dijon ; T = Toulouse

L'adsorption de l'atrazine et de la métamitronne est beaucoup plus faible que celle du glyphosate et de la trifluraline. Ces deux herbicides mettent en jeu des mécanismes d'adsorption de faible énergie et le facteur principal qui régit leur adsorption est la matière organique des sols. Dans le cas de la trifluraline, interviennent en plus des mécanismes d'exclusion hydrophobe. L'adsorption très importante du glyphosate dans les sols est due, quant à elle, à des mécanismes de plus grande énergie, complexation et interactions ioniques. Elle est d'autant plus importante que le pH du sol est acide (Toulouse) et est plus élevée dans les sols qui contiennent du cuivre et du fer amorphe et peu de phosphate.

Le glyphosate est difficilement désorbable : au maximum 40 % du glyphosate adsorbé est désorbé, alors que plus de 60 % d'atrazine et de métamitronne sont désorbés. La trifluraline est également difficilement désorbable (au maximum 20 %).

Dégradation des herbicides dans les sols

Le glyphosate est l'herbicide se minéralisant le plus rapidement, en particulier dans les sols carbonatés : entre 30 et 60 % du glyphosate sont minéralisés en 42 j. Les cinétiques de minéralisation correspondent à des cinétiques d'ordre 1, ce qui permet le calcul des $T_{1/2}$. D'une façon générale la minéralisation des herbicides décroît dans le sens : glyphosate > métamitronne > trifluraline (*Tableau 2*).

La minéralisation la plus faible du glyphosate dans le sol de Toulouse correspond à l'adsorption maximale qui se produit dans ce sol. Tous les facteurs modifiant l'adsorption joueront un rôle direct dans l'intensité de la minéralisation (Moshier & Penner, 1978).

Tableau 2 : Durées de demi-vie de minéralisation ($T_{1/2}$), de dégradation (DT50) des herbicides et quantités d'herbicide minéralisé au bout de 42 jours

HERBICIDE	Minéralisation $T_{1/2}$ (j)			Herbicide minéralisé à 42 j (% Q initiale)			Dégradation DT50 (j)
Glyphosate	18(D)	24(C)	54 (T)	30(T)	55(C)	60 (D)	2.5(C) 5(D) 43 (T)
Métamitronne	66(C)	138(D)	173 (T)	12(T)	16(D)	28(C)	8 (C) 28 (D,T)
Trifluraline	990(T,C)	1155 (D)		1.5(D)	2(C)	3(T)	23 (T) 29 (D,C)

D'après les DT50 obtenues, la persistance du glyphosate est très différente entre les sols carbonatés (Châlons, Dijon) et le sol acide (Toulouse) : de 2.5 et 5 j à 43 j (*Tableau 2*). Le principal mécanisme de dissipation de cet herbicide est la minéralisation qui dépend de la disponibilité de la molécule donc de l'intensité de l'adsorption. La métamitronne présente un intervalle de variation de DT50 plus faible que le glyphosate, mais relativement important : 8 à 28 j. Les DT50 de la trifluraline, environ 27 j, varient faiblement en fonction du type de sol. Le principal mécanisme de dissipation est la volatilisation, amplifiée par les conditions de température et d'humidité de l'expérimentation.

Éléments pour l'estimation des risques d'exposition

L'indice GUS, proposé par Gustafson (1989) : $GUS = \log(DT50) (4 - \log(Koc))$, permet de faire une évaluation comparative des risques de contamination des nappes par lixiviation intégrant la mobilité du pesticide, estimée par son coefficient d'adsorption, et la persistance, estimée par son DT50. Le *tableau 3* résume les valeurs de GUS pour les quatre herbicides dans les trois sols. Pour l'atrazine, nous avons choisi une DT50 de 40 j, correspondant aux valeurs moyennes que l'on trouve dans la littérature (Tomlin, 1995 ; Roberts, 1998).

Tableau 3 : Indice GUS des herbicides dans les trois sols

Sol/Herbicide	Glyphosate	Atrazine	Métamitronne	Trifluraline
Châlons	+0.29	+3.28	+1.95	+1.01
Dijon	+0.31	+3.35	+3.07	+0.82
Toulouse	-1.09	+2.29	+2.98	+0.65

Un GUS > 2.8 indique un risque élevé de contamination des nappes, un GUS < 1.8, un risque faible. Le glyphosate et la trifluraline présentent donc *a priori* peu de risques de lixiviation. En revanche, la métamitronne et surtout l'atrazine ont un risque élevé.

L'approche précédente fait une estimation à partir des propriétés intrinsèques des pesticides, mais fait l'impasse sur les conditions pédo-climatiques de leur utilisation. Cela peut en partie être pris en compte avec l'utilisation d'un modèle de simulation numérique. Nous avons utilisé le modèle PRZM, avec les scénarios pédo-climatiques retenus au niveau européen pour l'évaluation environnementale des pesticides dans le cadre de leur homologation. Nous avons assimilé aux sols de Châlons et Dijon le scénario de Châteaudun (sol carbonaté argilo-limoneux) et le sol de Toulouse au scénario de Piacenza (sol limoneux à pH neutre). Les paramètres d'entrée des herbicides (Kd et DT50) ont été ceux obtenus dans ce travail. Nous avons choisi d'utiliser comme indicateurs de risque comparatifs les quantités d'herbicide lixiviées à 1 m de profondeur (indicateur de mobilité) et les quantités d'herbicide restant dans les sols au bout de 20 ans d'application (indicateur de persistance).

Tableau 4 : Résumé des résultats obtenus par les simulations avec PRZM 2

Indicateur de risque	Plantes ¹	Sol	Maïs ²	Betterave ²	Colza ²
Concentration en herbicide à 1 m de profondeur	OGM	Carbonaté	-	-	-
		Limon neutre	-	-	-
	Non-OGM	Carbonaté	-	-	-
		Limon neutre	+++	-	-
Quantité d'herbicide restant dans les sols au bout de 20 ans	OGM	Carbonaté	-	-	-
		Limon neutre	++	+	+++
	Non-OGM	Carbonaté	+	+	++
		Limon neutre	+	-	++

¹OGM signifie que du glyphosate a été appliqué sur les cultures, non-OGM que les herbicides classiques ont été appliqués (maïs : atrazine, betterave : métamitronne, colza : trifluraline) ;

² les signes – indiquent que les concentrations ou les quantités restantes sont nulles ou négligeables, les signes + indiquant des quantités d'herbicide plus importantes.

Le glyphosate, la métamitronne et la trifluraline ne seraient pas susceptibles d'être lixiviés à long terme contrairement à l'atrazine que l'on retrouverait en quantités non négligeables dans le cas de sol limoneux à pH neutre (*Tableau 4*). Pour ce qui concerne les quantités d'herbicide restant dans les sols, la simulation montre que dans le sol limoneux à pH neutre on retrouverait les quantités de glyphosate les plus importantes et particulièrement dans le cas des cultures de colza. Ces résultats ne doivent être considérés qu'à titre indicatif, plutôt générateurs de pistes de recherche pour vérifier la justesse des estimations.

CONCLUSION

Le glyphosate est l'herbicide le plus fortement adsorbé dans les trois sols et celui qui se minéralise le plus rapidement. Mais, dans certains sols (sablo-limoneux à pH acide type Toulouse), les durées de demi-vie de dégradation du glyphosate sont supérieures à celles de la métamitronne et de la trifluraline. Les résultats de simulation montrent que le glyphosate a un faible potentiel de lixiviation. Sa persistance dans le sol semble être dépendante des conditions agronomiques en liaison avec l'espèce cultivée. Ces résultats de simulation préliminaires méritent d'être approfondis (étude de sensibilité du modèle, validation expérimentale).

BIBLIOGRAPHIE

- Gerritse R.G., Beltran J., Hernandez F., 1996. Adsorption of atrazine, simazine, and glyphosate in soils of the Gnangara Mound, Western Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 34 : 599-607.
- Glass R.L., 1987. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals. *J. Agric. Food Chem.*, 35, 497-500.
- Hance R.J., 1976. Adsorption of glyphosate by soils. *Pestic. Sci.*, 7, 363-366.
- Moshier L.J., Penner D., 1978. Factors influencing microbial degradation of ¹⁴C-glyphosate to ¹⁴CO₂ in soil. *Weed Sci.*, 26, 686-691.
- Roberts T. (Ed.), 1998. Metabolic pathways of agrochemicals. Part 1 : Herbicides and plant growth regulators. *The Royal Society of Chemistry*.
- Sprankle P., Meggit W.F., Penner D., 1975a. Rapid inactivation of glyphosate in the soil. *Weed Sci.* 23, 224-228.
- Sprankle P., Meggit W.F., Penner D., 1975b. Adsorption, mobility and microbial degradation of glyphosate in the soil. *Weed Sci.* 23, 229-234.
- Tomlin C. (Ed.), 1995. The pesticide manual. Tenth edition. *Crop protection publication*.