

Pesticides

Herbicides et insectes pollinisateurs

par Marc-Édouard Colin

Parmi les pesticides de synthèse autorisés et vendus en France, les herbicides représentent les tonnages les plus élevés. Ainsi les ventes de glyphosate (substance active du Roundup® entre autres) sont estimées à 6 000 tonnes annuelles ; pour le prosulfocarbe à 4 000 tonnes ; pour le S-métolachlore 1 500 tonnes ; pour la pendiméthaline 1 500 tonnes ; pour le chlorméquat 1 100 tonnes ; pour le chlortoluron 1 000 tonnes. Restent encore 90 substances actives herbicides dont les ventes ne dépassent pas 1 000 tonnes !

Les facettes multiples des substances actives herbicides dans l'environnement

Les 6 herbicides les plus vendus ont une dispersion et une persistance dans l'environnement très variables, d'abord dues à leurs propriétés physico-chimiques.

La première est la **solubilité dans l'eau**, qui indique la facilité de la substance active à être entraînée dans le cycle de l'eau (voir figure 1). En revanche, une forte solubilité dans l'eau s'accompagne

d'une faible solubilité dans les solvants organiques (acétone, naphthalène, alcools, etc.) (voir tableau 1).

Dans les conditions naturelles, cette solubilité dans l'eau est contrebalancée par le **pouvoir de fixation à la matière organique présente dans le sol**, exprimé par la valeur K_{oc}^1 , coefficient de partage carbone organique/eau. Ainsi, plus le K_{oc} est élevé, plus le pesticide se fixera sur la partie solide du sol plutôt que de rester dans la phase aqueuse.

1 – Le K_{oc} est le rapport entre la quantité adsorbée d'un composé par unité de masse de carbone organique du sol ou d'un sédiment et la concentration de ce même composé en solution aqueuse à l'équilibre (exprimé en L/kg).

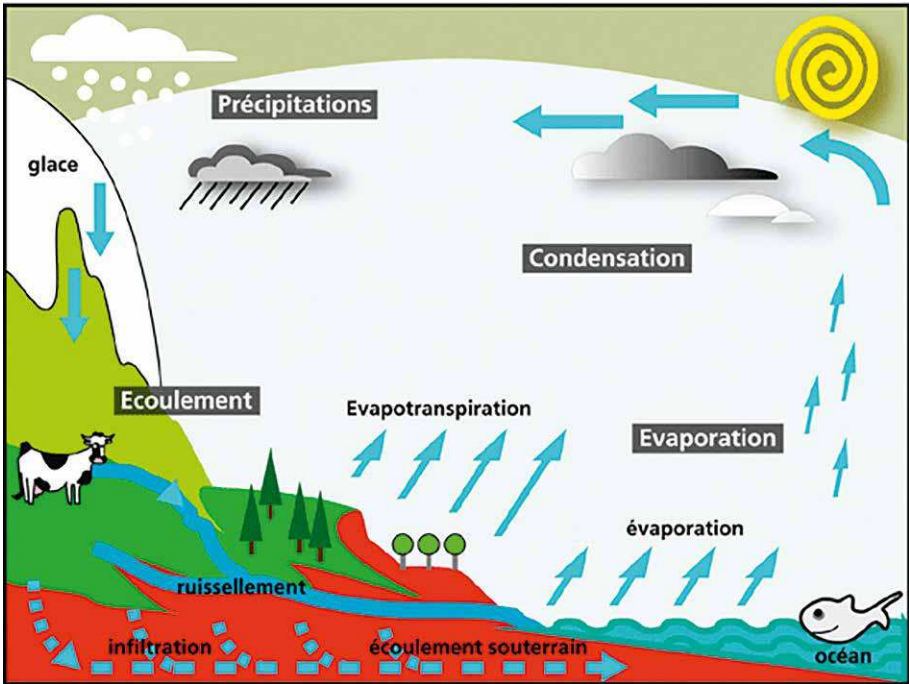


Figure 1 : Le cycle de l'eau simplifié

Par exemple (voir tableau 1) :

- Le glyphosate est le plus soluble dans l'eau des 6 herbicides présentés dans le tableau mais c'est aussi celui qui a l'aptitude la plus grande à se fixer à la matière organique du sol, encore faut-il que le sol en renferme !
- Le prosulfocarbe est très peu soluble dans l'eau mais sans grand pouvoir de fixation sur la matière organique.

Toujours dans des conditions naturelles, la substance active est soumise

aux rayonnements lumineux et à des possibilités de **dégradation dans l'eau**.

Par exemple (voir tableau 1) :

- Glyphosate et prosulfocarbe ne se dégradent ni dans l'eau, ni sous l'action de la lumière.
- À l'inverse, le S-métolachlore et la pendiméthaline sont peu stables à la lumière, ce qui pourrait être considéré comme un avantage environnemental à condition que les produits de dégradation de ces molécules ne soient pas eux-mêmes toxiques.

	Solubilité	Solubilité	Stabilité	Stabilité	Volatilité	Koc*	DT 90**	GUS***	****Bio-concentration
	eau (mg /L)	solv. organ.	lumière	eau	(mPa)	(L/ kg)	(jours)		
glyphosate	100 000	faible	stable	stable	0,01	30 000	170	0,21	0,5
prosulfocarbe	13,2	bonne	stable	stable	0,79	1 367	41	0,76	700
S métolachlore	480	bonne	limitée	stable	3,7	489	112	2,32	68,8
chlorméquat	88 600	faible	?	?	0,01	112	102	2,57	?
pendiméthaline	0,33	bonne	limitée	stable	3,34	15 744	423	0	5 100
chlorotoluron	76	bonne	stable	stable	0,008	246	260	2,01	40

* Koc : liaison avec la matière organique plus le Koc est élevé plus la substance se liera à la phase solide du sol par rapport à la phase aqueuse

** DT 90 : durée de disparition de 90 % de l'herbicide

*** GUS : capacité à pénétrer dans les eaux souterraines

**** Bioconcentration : rapport entre la concentration dans un organisme vivant et celle de son environnement

Tableau 1 : comparaison des propriétés physico-chimiques des 6 herbicides les plus vendus (en tonnage)

La **volatilité** est une autre propriété physique importante, qui va conditionner en partie la diffusion de l'herbicide dans l'atmosphère.

On peut considérer que le glyphosate et le chlortoluron ne sont que très peu volatils, contrairement au S-métolachlore et à la pendiméthaline (voir tableau 1).

Fixation et concentration des herbicides dans l'environnement et chez les êtres vivants

Pendant et après l'épandage d'herbicides dans les cultures, plusieurs critères,

relevant en partie des propriétés physico-chimiques, rendent compte des potentialités de dispersion et de persistance des herbicides dans l'environnement :

- **La durée de disparition de 90 % de l'herbicide dans le sol ou DT90.** Selon le tableau 1, elle est variable : 423 jours pour la pendiméthaline et 41 jours pour le prosulfocarbe. Cette donnée très importante est cependant incomplète car la durée de disparition des produits de dégradation de la substance active dans le sol n'est pas toujours évaluée par des études scientifiques indépendantes des firmes fabricantes.

- **Le potentiel de pénétration dans les couches profondes du sol.**

L'abréviation du terme anglais, «GUS»², est généralement utilisée. Ce coefficient est très faible pour la pendiméthaline et le glyphosate, ce qui indique une très faible pénétration dans le sol, et *a contrario* très élevée pour le S-métolachlore.

- **La bioconcentration** : elle se définit comme la tendance d'un toxique présent dans l'environnement, à s'accumuler dans un organisme vivant. Il y a bioconcentration quand un organisme vivant concentre plus de toxiques qu'il n'y en a dans son milieu environnant. Lorsqu'il y a une forte bioconcentration toute la chaîne alimentaire est menacée.

On pense immédiatement à la bioconcentration des organismes aquatiques à partir des eaux dans lesquelles ils vivent. Cependant, l'air, la surface des végétaux traités ou non, peuvent sans doute être à l'origine de bioconcentrations mais cela est peu documenté.

Par exemple (voir tableau 1) :

- *Le glyphosate a un pouvoir de bioconcentration quasi nul, ce qui veut dire qu'un individu contaminé rejette rapidement le glyphosate par ses urines ou ses excréments, lorsque le milieu ambiant est contaminé.*
- *Au contraire, les herbicides très peu solubles dans l'eau comme le*

prosulfocarbe ou la pendiméthaline, possèdent un pouvoir de bioconcentration inquiétant.

Paramètres influençant la dispersion des herbicides

Sur le terrain, les propriétés physico-chimiques des herbicides n'expliquent pas toute la dispersion et la persistance que l'on peut y constater.

Entrent en jeu les conditions météorologiques. Les pluies favorisent le retour sur terre des herbicides présents dans les nuages, le ruissellement et la pénétration des herbicides dans les couches profondes du sol. Les climats secs favorisent l'érosion superficielle du sol et ainsi la dispersion de particules sèches parfois à très longues distances (voir figure 2).

Les conditions d'épandage des herbicides (pulvérisations, granulés, irrigation etc.) influencent aussi leur dispersion au moment de l'épandage et après. Il est évident que plus l'épandage est proche d'eaux courantes ou dormantes, plus le risque de pollution est élevé, même si la fixation à la matière organique du sol est forte comme celle du glyphosate (Lazartigues, 2010). Si l'herbicide contamine une nappe phréatique (« GUS » élevé), les sources, les cours d'eau, les pompages alimentés par cette nappe restitueront de l'eau polluée.

2 – GUS : « *Groundwater Ubiquity Score* ». Le GUS prend en compte la mobilité des pesticides et leur persistance dans le sol et donne une évaluation du risque de pollution des eaux souterraines. Selon le consensus, les pesticides avec un GUS supérieur à 2,8 seront retrouvés dans les eaux souterraines et ceux avec un GUS inférieur à 1,8 auront très peu de risques de l'être.

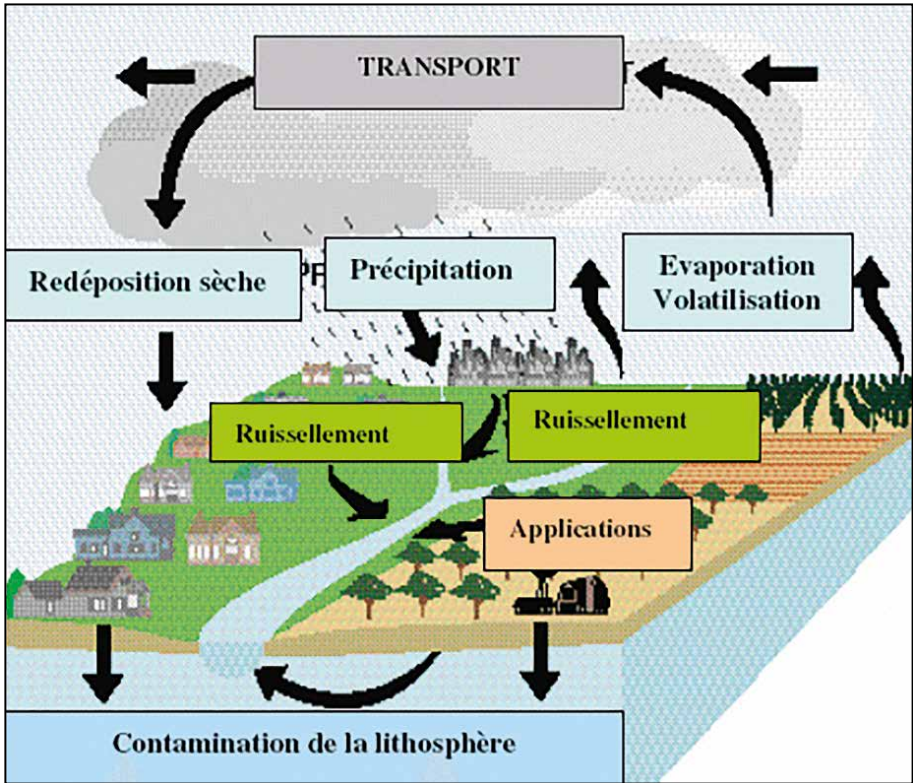


Figure 2 : Cycle de contamination atmosphérique par les pesticides

L'air est évidemment contaminé au moment des pulvérisations d'herbicides mais, pendant plusieurs semaines à plusieurs mois, le sol imprégné renvoie des quantités non négligeables d'herbicides dans l'atmosphère. C'est le phénomène de volatilisation qui concerne même des substances actives non volatiles.

Par exemple :

- *Le glyphosate qui n'est pas volatil, et le prosulfocarbe qui est peu volatil sont retrouvés dans des capteurs*

atmosphériques, y compris ceux placés dans des parcs nationaux et forêts en Allemagne : le glyphosate est présent dans 100 % des capteurs et dans 80 % de ceux-ci pour le prosulfocarbe (Kruse-Plass et coll., 2021).

Un herbicide de la grande famille des carbamates : le prosulfocarbe

Les carbamates sont d'abord connus pour leurs propriétés insecticides, exploitées au début des années 60.

Quelques années plus tard, ce sont les propriétés fongicides et herbicides des molécules de cette famille qui ont renforcé l'arsenal phytosanitaire de l'agriculture intensive.

D'une façon générale, les substances actives de la famille des carbamates sont des inhibiteurs enzymatiques. L'inhibition de l'acétylcholine-estérase, une enzyme essentielle dans la communication entre neurones, a justifié l'utilisation d'une vingtaine de molécules de cette famille comme insecticide-acaricide. Moins d'une dizaine sont encore autorisées en 2021. Certaines d'entre elles sont considérées comme systémiques, c'est-à-dire qu'elles diffusent facilement dans toutes les parties de la plante traitée, ce qui permet l'exposition de ravageurs ayant échappé au nuage de pulvérisation. Cette propriété de systémie dans la plante se retrouve dans les carbamates fongicides. Le mode d'action de ces fongicides n'est évidemment pas l'inhibition de l'acétylcholine-estérase mais celle de plusieurs autres enzymes intervenant dans la synthèse de lipides (acides gras, phospholipides etc.), de certains stérols, du carotène. Ces nombreux sites d'action ont d'ailleurs été exploités comme argument de vente : « fongicides multi-sites ».

Parmi les carbamates, le prosofocarbe, molécule connue depuis 1954, est utilisé comme herbicide. Il connaît un nouveau développement dans le contrôle des « mauvaises » herbes grâce à ses propriétés d'inhibition des élongases, enzymes qui allongent les chaînes d'acides gras chez l'ensemble

des êtres vivants, dont les végétaux. Plus spécifiquement au monde végétal, le prosofocarbe inhibe des enzymes assurant la synthèse des hormones de développement du végétal : les gibérellines. Cependant, selon Lock (2020), les propriétés d'inhibition de la choline-estérase des Vertébrés sont conservées dans les herbicides de cette famille, certains produits de dégradation étant même plus actifs que la molécule-mère.

Ce bref aperçu de la famille des carbamates montre clairement que la plupart des pesticides ont un site d'action justifiant leur utilisation comme insecticide, fongicide ou herbicide, mais qu'ils en possèdent généralement plusieurs autres, que ce soit la molécule-mère ou ses produits de dégradation. Les sites d'action qualifiés de « secondaires » sont souvent responsables d'effets non intentionnels sur la faune et la flore. Hélas, leur responsabilité n'est souvent mise en évidence que de trop nombreuses années après leur mise sur le marché.

Effets sublétaux des herbicides sur les abeilles

Ce sujet est peu développé dans la littérature scientifique puisque les herbicides sont supposés « *a priori* » n'avoir aucune propriété insecticide. Pourtant cette affirmation devrait être démontrée avant d'être édictée. En effet, on sait que les herbicides et/ou leurs produits de dégradation sont présents temporairement ou en permanence dans les sols, les eaux, dans l'air et sur des surfaces agricoles

cibles et sur des surfaces non-cibles. D'une façon globale, les insectes sont en déclin dans les zones agricoles, ce qui a été récemment confirmé par une étude allemande (Bruehl et coll., 2021). Tous les prélèvements d'insectes dans des aires de conservation de la nature (au sein et hors des zones agricoles) sont contaminés par les pesticides. En moyenne les analyses révèlent 16,7 pesticides différents par prélèvement d'insectes. Parmi ces pesticides, les herbicides dont le prosulfocarbe sont largement représentés.

Les abeilles sauvages nichant dans le sol sont certainement les plus touchées par les résidus d'herbicides, mais la documentation manque à ce sujet. En ce qui concerne les abeilles domestiques, la documentation est aussi très pauvre. Mentionnons cet article récent de Macri et coll. (2021) qui soulève bien le problème des effets sublétaux des herbicides. Dans une région argentine de culture de soja, de maïs et de tournesol génétiquement modifiés pour la résistance aux herbicides, les sols sont traités aux herbicides en pré-semis. Puis, environ deux mois après, les plants sont traités avec un mélange de trois herbicides (glyphosate, atrazine et 2,4D) en présence de ruches. L'activité de butinage est évaluée à l'entrée des colonies expérimentales et des prélèvements d'abeilles d'intérieur et de couvain sont régulièrement effectués. Avant le traitement herbicide post-émergence à base de ce mélange de trois herbicides, les abeilles butinent sur la flore sauvage et 20 jours après traitement, sur les cultures en fleur. L'activité générale de butinage et le

nombre de pourvoyeuses de pollen baissent très significativement après traitement herbicide. Dans le couvain, les analyses spécifiques montrent une baisse des capacités de détoxification. Les herbicides ne sont sans doute pas responsables de la mort rapide de butineuses mais le comportement de butinage des colonies peut être affecté, ce qui n'empêche pas les herbicides d'être présents dans le couvain et d'y provoquer des perturbations physiologiques.

Cet article de Macri et coll., non seulement procure la preuve d'une toxicité à bas bruit des herbicides pour la colonie d'abeilles, mais aussi propose un protocole expérimental de terrain qui devrait servir d'exemple et remplacer les procédures réglementaires d'évaluation des pesticides, largement obsolètes du point de vue scientifique. Les herbicides participent donc au déclin des insectes même s'il est difficile de préciser leur niveau de responsabilité.

Conclusion

Les herbicides présentent une grande facilité de dispersion dans l'environnement. Ils n'y sont que rarement présents en tant que molécule unique. Cette constatation s'explique en partie par le succès des mélanges de 2, 3 voire 4 herbicides dans les préparations commerciales proposées aux agriculteurs. Par leur présence permanente et en synergie avec les autres pesticides (Almasri et coll., 2020), les herbicides participent au déclin des insectes dans les zones de conservation de la nature, en Allemagne et sans doute dans d'autres pays.

Les insectes pollinisateurs qui collectent leurs aliments sur une grande surface et qui les accumulent dans leurs nids y sont les plus exposés. C'est pourquoi leurs fonctions d'espèces bio-indicatrices sur la qualité de l'environnement et aussi sur la santé des Vertébrés devraient être systématiquement prises en compte dans tout bilan environnemental ou toute étude d'impact plus spécifique. L'homme, comme la faune, est exposé de façon souvent permanente aux cocktails d'herbicides ce qui peut être à l'origine de maladies chroniques. Malgré ce risque majeur, la toxicité des mélanges d'herbicides n'est toujours pas l'objet d'une évaluation tant au niveau européen que national.

Pour la médecine des végétaux comme pour celles des animaux et de l'Homme, le principe «d'abord ne pas nuire» devrait s'imposer dans les dossiers d'évaluation des pesticides, surtout quand les résultats des essais au laboratoire et/ou sur le terrain donnent des résultats divergents.

Références

- Almasri H., Tavares D., Pioz M. *et al.* (2020). Mixtures of an insecticide, a fungicide and a herbicide induce high toxicities and systemic physiological disturbances in winter *Apis mellifera* honey bees. *Ecotox Environ Safety* 203 111013.
- Bruel C., Bakanov N., Koeth S. *et al.* (2021). Direct pesticide exposure of insects in nature conservation areas in Germany. *Nature scientific reports*, 2021 11:24144.
- Kruse Plass M., Hofmann F., Wosniok W., Schlechtriemen U., Kohlschütter N. (2021). Pesticides and pesticide related products in ambient air in Germany. *Environ Sci Eur* (2021) 33:114 doi. org/10.1186/s12302 021 00553 4.
- Lock E. (2020). Inhibition of rat brain and human red cell acetylcholinesterase by thiocarbamate herbicides. *Toxicology Research*, 2020, 9, 591–600.
- Lazartigues A. (2010). Pesticides et polyculture d'étang : de l'épandage sur le bassin versant aux résidus dans la chair de poisson. *Sciences agricoles*, Inst. Nat. Polytech. Lorraine.
- Macri, I.N., Vázquez, D.E., Pagano, E.A., Zavala, J.A., Farina, W.M. (2021). Evaluating the impact of post-emergence weed control in honeybee colonies located in different agricultural surroundings. *Insects*, 12, 163. doi.org/10.3390/insects12020163.

