

Approches de modélisation pour évaluer les effets écotoxicologiques des pesticides : revue critique

Larras Floriane (1), Charles Sandrine (2), Chaumot Arnaud (3), Pelosi Céline (4),
Le Gall Morgane (5) Mamy Laure (6), Beaudouin Rémy (7)

⁽¹⁾ INRAE, DEPE, 147 rue de l'Université 75338 Paris Cedex 07 – floriane.larras@inrae.fr

⁽²⁾ Université Lyon 1, UMR 5558, 43 boulevard du 11 novembre 1918 69100 Villeurbanne –
sandrine.charles@univ-lyon1.fr

⁽³⁾ INRAE, UR RiverLy, 5 rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne Cedex –
arnaud.chaumot@inrae.fr

⁽⁴⁾ INRAE, Avignon Université, UMR EMMAH, 228 route de l'Aérodrome, CS 40 509, 84914 Avignon
Cedex 9 – celine.pelosi@inrae.fr

⁽⁵⁾ Ifremer, Information Scientifique et Technique, Bibliothèque La Pérouse, 15 rue Dumont D'Urville - BP
70, 29280 Plouzané – morgane.le.gall@ifremer.fr

⁽⁶⁾ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 22 Place de l'Agronomie 91120
Palaiseau – laure.mamy@inrae.fr

⁽⁷⁾ Ineris, UMR-I 02 SEBIO, Parc technologique Alata - BP2, 65550 Verneuil en Halatte –
Remy.BEAUDOUIIN@ineris.fr

Devant la multiplicité et la diversité des pesticides, des contextes agro-pédoclimatiques, des bioagresseurs, des écosystèmes récepteurs et des espèces en présence, il est impossible de réaliser des expériences de laboratoire ou sur le terrain pour évaluer les impacts à court et long termes de toutes les substances dans tous les milieux, aux différentes échelles d'organisation biologique et sur l'ensemble de la biodiversité. Par conséquent, dans une démarche d'extrapolation à partir des données expérimentales disponibles, de nombreux modèles sont développés pour évaluer les effets écotoxicologiques des pesticides.

Ce travail a consisté à réaliser une revue bibliographique des approches de modélisation permettant d'évaluer les effets des pesticides sur les organismes, populations et communautés des espèces non-cibles.

1. Modèles d'effets écotoxicologiques et écologiques des pesticides

L'analyse de la bibliographie a montré que les modèles développés pour prédire les effets écotoxicologiques et écologiques des pesticides peuvent se classer en six grandes catégories (Larras et al., 2022a ; Mamy et al., 2022) (Tableau 1) : (1) relations structure-activité quantitatives (QSAR) ; (2) dose-réponse (DR) et toxicocinétique-toxicodynamique (TKTD) ; (3) modèles de population ; (4) modèles multi-espèces ; (5) modèles à l'échelle du paysage ; (6) modèles de mélanges. L'ensemble de ces modèles a été développé pour diverses espèces (microorganismes, producteurs primaires, vertébrés et invertébrés terrestres et aquatiques) appartenant à divers compartiments de l'environnement (par exemple, sol, eau), pour répondre à différents objectifs comme la sensibilité des espèces, la bioaccumulation des pesticides ou encore la protection des services écosystémiques. Certains modèles tiennent compte des pratiques agricoles ou de la variabilité de la structure paysagère, d'autres non.

Tableau 1. Principales catégories de modèles écotoxicologiques et écologiques recensés dans la bibliographie (D'après Larras et al., 2022a).

Catégorie	Modèles	Caractéristiques	Sorties d'intérêt
QSAR	Relation structure-activité quantitative	Relation entre structures chimiques et activités des pesticides	Toxicité aiguë, propriétés mutagènes, facteurs de bioconcentration
DR et TKTD	Dose-Réponse (DR)	Relation entre concentration d'exposition et réponse ou effet individuel, après un temps d'exposition fixé	Survie, croissance, reproduction, mobilité, activités enzymatiques, taux d'alimentation...
	ToxicoCinétique-ToxicoDynamique (TKTD)	Relation exposition-effet individuel, incluant l'évolution au cours du temps de l'exposition et des effets	Survie, croissance, reproduction, mobilité, activités enzymatiques, taux d'alimentation...
Population	Population	Relation entre effets toxiques individuels et réponse démographique, incluant les conditions écologiques d'existence de la population	Taux d'accroissement de population, densité de population, risque d'extinction, temps de récupération démographique...
Multi-espèces	Distribution de sensibilité des espèces (SSD)	Effets à l'échelle d'un ensemble d'espèces (sans prise en compte des interactions entre espèces)	Évaluation probabiliste d'une concentration dangereuse pour un certain % d'espèces dans l'assemblage
	Réseaux trophiques (ou chaînes trophiques)	Interactions écologiques entre espèces en présence : modèles « simples » (par exemple, relation prédateur-proie) ou « complexes » (réseau d'interactions écologiques et prise en compte des facteurs abiotiques)	Bioamplification et effets indirects <i>via</i> le phénomène des cascades trophiques
	Modèle de communauté		Effets directs sur les espèces et/ou indirects sur les relations entre espèces, à l'échelle de la communauté et/ou sur les services écosystémiques
Paysage	Modèles d'habitats aux échelles locales, régionales ou nationales	Impacts écologiques à l'échelle du paysage, prise en compte de la dimension spatiale (de façon implicite ou explicite)	Réponses démographiques au sein de différents habitats, maintien d'espèces non-cibles, niveaux de contamination
Mélanges	Addition des concentrations, action indépendante, TKTD	Effets des mélanges de pesticides sur les traits de vie individuels	Synergie, antagonisme, neutralité

2. Modèles utilisés dans le cadre réglementaire pour évaluer les risques écotoxicologiques liés aux pesticides

Au niveau réglementaire, les modèles utilisés pour évaluer les effets des pesticides sont majoritairement les QSAR, DR, TKTD et SSD (Larras et al., 2022a ; Larras et al., 2022b). Les QSAR sont largement acceptés dans les dossiers de demande d'approbation des substances actives et de mise sur le marché des pesticides car ils permettent d'estimer un grand nombre d'indicateurs d'intérêt (Tableau 1). Les modèles DR sont notamment systématiquement employés pour estimer des concentrations effectives à x% (par exemple, concentration produisant 50% d'effet CE50) comme alternatives aux NOEC (concentration sans effet observé) / LOEC (concentration minimale produisant un effet observable). Les modèles TKTD permettent d'évaluer des effets létaux et sublétaux en incluant la dimension temporelle, mais ils sont encore aujourd'hui majoritairement utilisés pour des organismes aquatiques. Les approches SSD sont recommandées pour tous types d'organismes (aquatiques, terrestres, végétaux) et elles présentent l'avantage d'inclure la sensibilité de plusieurs espèces simultanément (généralement entre cinq et huit, parfois plus selon le type d'organisme) à un contaminant donné. Cependant, elles ne peuvent pas être appliquées à l'échelle de tous les groupes biologiques, notamment celui des arthropodes en raison d'un

manque de données. L'intérêt des modèles « populations », « communautés » et « paysages » pour l'évaluation des risques est reconnu même s'ils restent encore peu utilisés (Larras et al., 2022a ; Larras et al., 2022b).

3. Discussion et conclusion

D'une manière générale, la majeure partie des modèles développés pour évaluer les effets écotoxicologiques des pesticides ne prend pas en compte les effets chroniques sublétaux ou transgénérationnels, ni les effets de facteurs de stress multiples (abiotique, biotique, chimique). La bibliographie souligne également un manque de données obtenues *in situ*, de données expérimentales portant sur les effets sublétaux et les effets chroniques au sein des populations exposées, et de données à long terme pour développer et tester les modèles. Les modèles mobilisés dans le cadre réglementaire n'abordent que rarement les changements de niveau d'organisation et/ou de spatialisation, pourtant nécessaires pour décrire les cycles de vie de certaines espèces. Le faible recours aux modèles de population, que ce soit pour l'évaluation prospective du risque ou pour le diagnostic des impacts des pesticides en milieu naturel, fait écho à une absence de formalisation d'indicateurs et de cadres d'interprétation partagés comme c'est le cas en biologie de la conservation, en gestion de l'exploitation de la faune sauvage ou pour le suivi des dynamiques épidémiques dans le domaine sanitaire. Quant aux modèles de communautés et de réseaux trophiques, ils ne sont pas suffisamment développés pour aborder certains processus écologiques et il n'existe encore que très peu de modèles qui couplent écotoxicologie et écologie, ou exposition et effet. Par ailleurs, cette synthèse bibliographique montre un déficit d'analyses de sensibilité et d'incertitudes de ces modèles, un déficit de test de leur performance et un déficit de test de la reproductibilité des résultats qu'ils fournissent (Larras et al., 2022a). Enfin, il serait particulièrement novateur d'arriver à coupler les modèles écotoxicologiques, tels que ceux qui ont été recensés pour décrire les effets des pesticides, à des modèles qui informent sur les liens existants entre les espèces en présence et les fonctions qu'elles assurent au sein des écosystèmes ainsi que les services qui leur sont associés.

Une modélisation plus robuste des effets des pesticides et d'autres facteurs de stress sur les organismes vivants, de leur application à leurs conséquences fonctionnelles sur les écosystèmes à différentes échelles de temps et d'espace, permettrait d'aller vers une gestion plus durable de l'environnement.

Mots-clés : Modèles ; Ecotoxicité ; Environnement ; Evaluation des risques ; Réglementation

Références :

- Larras F., Charles S., Chaumot A., Pelosi C., Le Gall M., Mamy L., Beaudouin R., 2022a. A critical review of effect modeling for ecological risk assessment of plant protection products. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 43448-43500.
- Larras F., Beaudouin R., Berny P., Charles S., Chaumot A., Corio-Costet M.F., Doussan I., Pelosi C., Leenhardt S., Mamy L., 2022b. A meta-analysis of ecotoxicological models used for plant protection product risk assessment before their placing on the market. *Science of the Total Environment* 844, 157003.
- Mamy L., Pesce S., Sanchez W., Amichot M., Artigas J., Aviron S., Barthélémy C., Beaudouin R., Bedos C., Bérard A., Berny P., Bertrand C., Bertrand C., Betouille S., Bureau-Point E., Charles S., Chaumot A., Chauvel B., Coeurdassier M., Corio-Costet M.F., Coutellec M.A., Crouzet O., Doussan I., Faburé J., Fritsch C., Gallai N., Gonzalez P., Gouy V., Hedde M., Langlais A., Le Bellec F., Leboulanger C., Le Gall M., Le Perchec S., Margoum C., Martin-Laurent F., Mongruel R., Morin S., Mougine C., Munaron D., Néliu S., Pelosi C., Rault M., Sabater S., Stachowski-Haberkorn S., Sucré E., Thomas M., Tournebize J., Achard AL, Le Gall M., Le Perchec S., Delebarre E., Larras F., Leenhardt S., 2022. Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques, Rapport d'ESCo, INRAE - Ifremer (France), 1408 pp.

Remerciements :

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'expertise scientifique collective « Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques » commanditée par les ministères de l'Agriculture, de l'Environnement et de la Recherche et pilotée par INRAE et l'Ifremer avec le soutien financier de l'Office Français de la Biodiversité (OFB) au travers du plan Ecophyto.