

Floriane Larras¹, Sandrine Charles², Arnaud Chaumot³, Céline Pelosi⁴, Morgane Le Gall⁵, Laure Mamy⁶, Rémy Beaudouin^{7,*}

¹INRAE, DEPE, 147 rue de l'Université, 75338 Paris ; ²Université Lyon 1, UMR 5558, 43 boulevard du 11 novembre 1918, 69100 Villeurbanne ; ³INRAE, UR RiverLy, 5 rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne ; ⁴INRAE, Avignon Université, UMR EMMAH, 228 route de l'Aérodrome, CS 40 509, 84914 Avignon ; ⁵Ifremer, Information Scientifique et Technique, Bibliothèque La Pérouse, 15 rue Dumont D'Urville - BP 70, 29280 Plouzané ; ⁶Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 22 Place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau ; ⁷Ineris, UMR-I 02 SEBIO, Parc technologique Alata - BP2, 65550 Verneuil en Halatte (Remy.BEAUDOIN@ineris.fr)

Introduction

- Devant la multiplicité et la diversité des pesticides (PPP), des contextes agro-pédoclimatiques, 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 de toutes les substances dans tous les milieux, aux différentes échelles d'organisation biologique et sur l'ensemble de la biodiversité
- La modélisation apparaît ainsi comme un outil fondamental pour évaluer les effets écotoxicologiques des PPP
- La modélisation permet aussi d'aborder des questions complexes, comme les effets des mélanges de PPP
- Enfin, elle est requise au niveau réglementaire dans le cadre de l'évaluation des risques liés aux PPP avant leur mise sur le marché
- **L'objectif de ce travail a consisté à réaliser une revue bibliographique des approches de modélisation permettant d'évaluer les effets des PPP sur les organismes, populations et communautés des espèces non-cibles**

Corpus bibliographique

- Les publications scientifiques et les actes de congrès ont été recherchés dans le Web of Science™ pour la période 2000-2021
- D'autres sources de données ont également été utilisées : PubMed®, Google Scholar, Scopus, littérature grise (documents réglementaires)
- Le corpus bibliographique final contient $n = 376$ articles après élimination de ~70% des articles initialement obtenus
- L'analyse bibliométrique a été réalisée avec Intellixir

Figure 1. Pays d'origine des premiers auteurs des articles du corpus bibliographique, en fonction du temps. Les nombres correspondent aux nombres d'articles

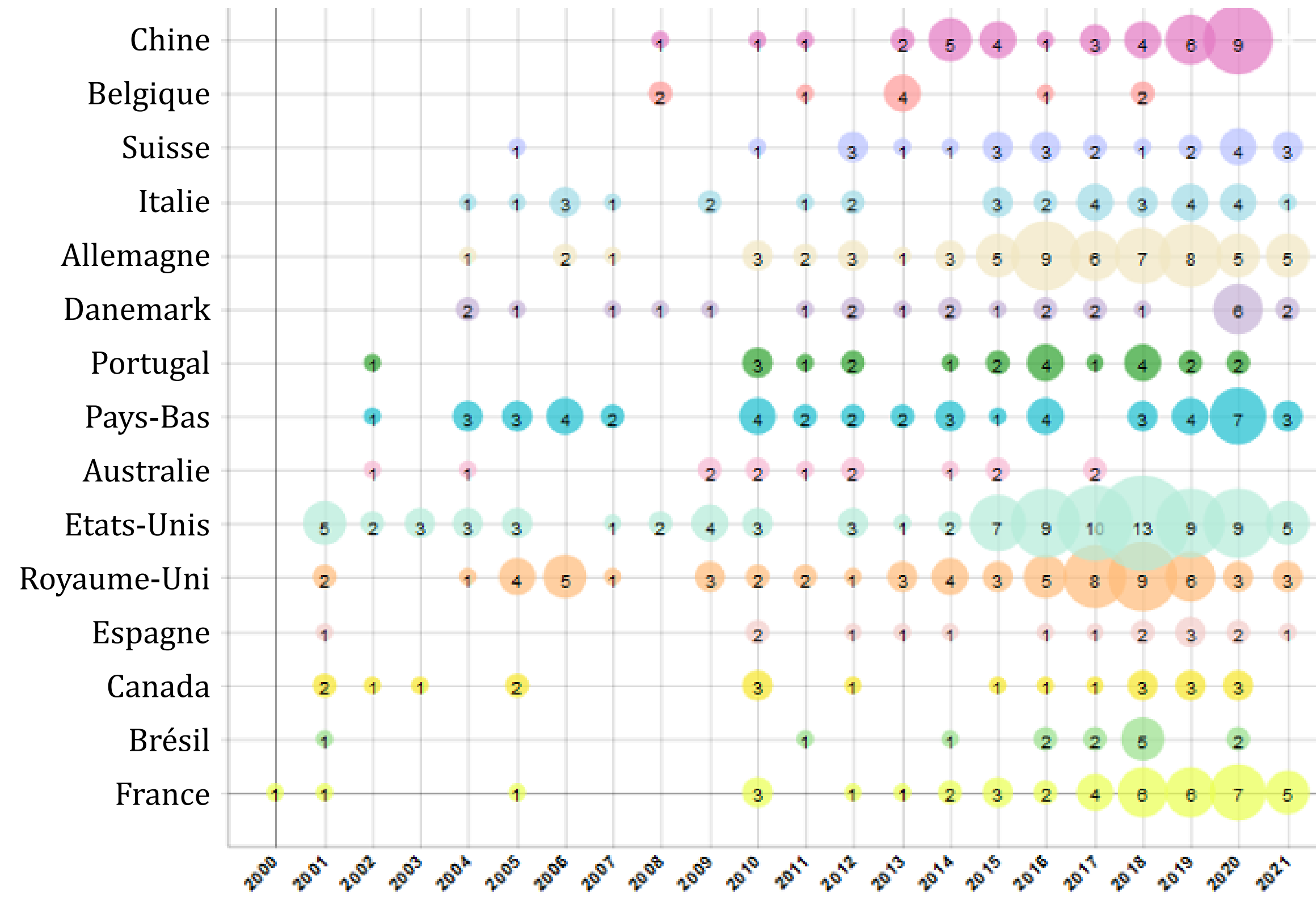


Tableau 1. Principales catégories de modèles écotoxicologiques et écologiques identifiés dans la bibliographie

Catégories	Modèles	Caractéristiques	Sorties d'intérêt
QSAR	Relation structure-activité quantitative	Relation entre structures chimiques et activités des PPP	Toxicité aiguë, propriétés mutagènes, facteurs de bioconcentration...
DR, TKTD	Dose-Réponse Toxicocinétique-Toxicodynamique	Relation entre concentration d'exposition et effets, au cours du temps pour TKTD	Survie, croissance, reproduction, mobilité, activité enzymatique, taux d'alimentation...
Population	Modèles démographiques	Relation entre effets individuels et réponse démographique	Taux d'accroissement de population, densité, biomasse, risque d'extinction...
Multi-espèces	Distribution de sensibilité des espèces Réseaux trophiques Modèles de communautés	Effets directs et/ou indirects des PPP sur un ensemble d'espèces, en interaction ou non	Évaluation probabiliste d'une concentration dangereuse pour un certain % d'espèces dans l'assemblage, biomagnification, modifications dans les interactions écologiques...
Paysage	Modèles d'habitats aux échelles locales, régionales ou nationales	Impacts écologiques de facteurs abiotiques sur la dynamique paysagère, dans le temps	Réponses démographiques au sein de différents habitats, niveaux de contamination
Mélanges	Addition des concentrations Action indépendante	Effets des mélanges de PPP sur les traits de vie individuels	Neutralité, synergie, antagonisme

Principaux résultats

- Six grandes catégories de modèles ont été identifiées (Tab. 1)
- L'évolution temporelle des articles sélectionnés montre une augmentation du développement de modèles au cours des 20 dernières années, ainsi qu'une contribution déséquilibrée des pays (Fig. 1) [1]
- La plupart des documents guide émis par les agences réglementaires concerne les invertébrés aquatiques. Les invertébrés terrestres et les poissons arrivent en 2^{ème} et 3^{ème} position (Fig. 2) [1]
- Au niveau réglementaire, les modèles les plus appliqués pour l'évaluation des risques liés aux PPP sont les QSAR, les TKTD et les modèles multi-espèces [1, 2]. L'intérêt des modèles mécanistes est de plus en plus reconnu mais ils ne sont pas encore pris en compte [2]
- Plusieurs voies d'amélioration des modèles ont été identifiées : effets multigénérationnels, facteurs de stress biotiques et abiotiques multiples... [1]
- Cette revue bibliographique souligne aussi un manque de tests de la performance des modèles, et d'analyses de sensibilité et d'incertitudes [1]

Conclusion

- La modélisation des effets écotoxicologiques des PPP, depuis l'application au champ (exposition) jusqu'aux conséquences fonctionnelles à différents niveaux biologiques et à différentes échelles de temps et/ou d'espace, contribue à la gestion durable des ressources naturelles
- Cependant, les données et les connaissances manquent encore pour alimenter les modèles innovants. Parmi eux, les « -omiques » sont encore sous-utilisées malgré leur grand potentiel pour l'évaluation des risques environnementaux

Figure 2. Approches d'évaluation des risques réglementaire par étapes (Tiers) illustrées pour les six catégories de modèles et les différents groupes biologiques

	Tiers	Producteurs primaires aquatiques	Macro-invertébrés aquatiques	Poissons	Organismes des sédiments	Organismes du sol	Arthropodes non-cibles	Abeilles	Plantes terrestres non-cibles	Oiseaux et mammifères	Amphibiens et reptiles
QSAR	1 or +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DR	1 or +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TK et/ou TD	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Population	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Paysage	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SSD	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Communauté	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Réseau troph.	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mélanges	1 or +	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

— Documents guide
 - - - Opinion Scientifique (SO) ou Rapport Technique (TR)
 - - - Dans SO ou TR : d'intérêt mais pas encore développé ou difficile à utiliser en raison d'un manque de données ou de guide
 — Etudes de toxicité pour ces organismes non requises dans les dossiers réglementaires

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'OFB, via le Plan Ecophyto, dans le cadre de l'expertise scientifique collective (ESCO) portant sur les impacts des PPP sur la biodiversité et les services écosystémiques, commanditée par les ministères de l'Ecologie, de la Recherche et de l'Agriculture. Les auteurs remercient Sophie Leenhardt (INRAE), chef de projet de l'ESCO, ainsi que Stéphane Pesce (INRAE) et Wilfried Sanchez (Ifremer), responsables scientifiques de l'ESCO avec Laure Mamy (INRAE)



REFERENCES

[1] Larras et al. 2022. A critical review of modelling approaches for environmental risk assessment due to pesticides. *Environ Sci Pollut Res* <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19111-3>
 [2] Larras et al. 2022. Critical review of ecotoxicological models used for plant protection product risk assessment before their placing on the market. *Sci Tot Environ* <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157003>

