

L'état des recherches en écotoxicologie des pesticides

Thierry CAQUET, DS Environnement, INRA – thierry.caquet@inra.fr



Séance Académie d'Agriculture, Paris, 22/05/2019

Pollutions environnementales : le diagnostic scientifique

Plan de la présentation



Introduction

1. Principes généraux
 2. Le paysage de la recherche
 3. Exemples de fronts de science et avancées récentes
- Conclusion : Quelques priorités pour le futur

Pesticides : une des causes de l'érosion de la biodiversité

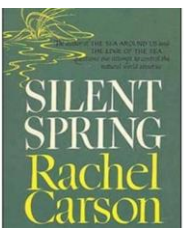


Science and Policy
for People and Nature

Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services – unedited advance version

B. Direct and indirect drivers of change have accelerated during the past 50 years

The rate of global change in nature during the past 50 years is unprecedented in human history. The direct drivers of change in nature with the largest global impact have been (starting with those with most impact): **changes in land and sea use**; direct exploitation of organisms; climate change; **pollution**; and invasion of alien species. Those five direct drivers result from an array of



RESEARCH ARTICLE

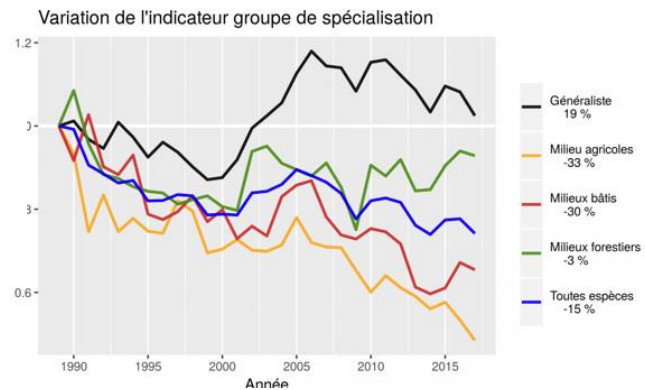
More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas

Caspar A. Hallmann^{1*}, Martin Sorg², Eelke Jongejans¹, Henk Siepel¹, Nick Hofland¹, Heinz Schwan², Werner Stenmans², Andreas Müller², Hubert Sumser², Thomas Hörrn², Dave Goulson³, Hans de Kroon¹

'Shocking' decline in birds across Europe due to pesticide use, say scientists

New figures reveal decline in farmland birds at a 'level approaching an ecological catastrophe'

https://www.birdlife.org/sites/default/files/attachm/ents/BL_ReportENG_V11_spreads.pdf



<http://vigienature.mnhn.fr/page/produire-des-indicateurs-partir-des-indices-des-especes-habitat>





1. Principes généraux

Ecotoxicologie, de quoi parle-t-on ?



Étude du devenir et des effets des substances toxiques dans les écosystèmes :

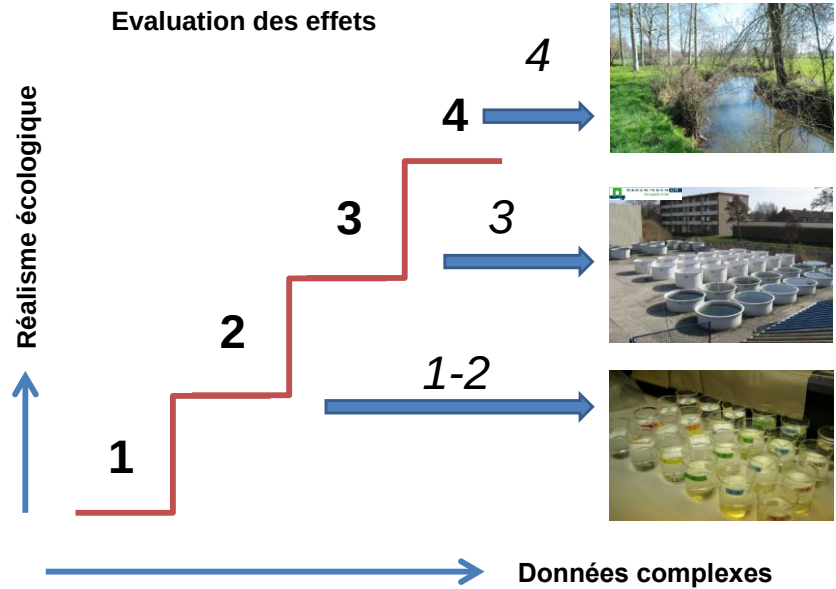
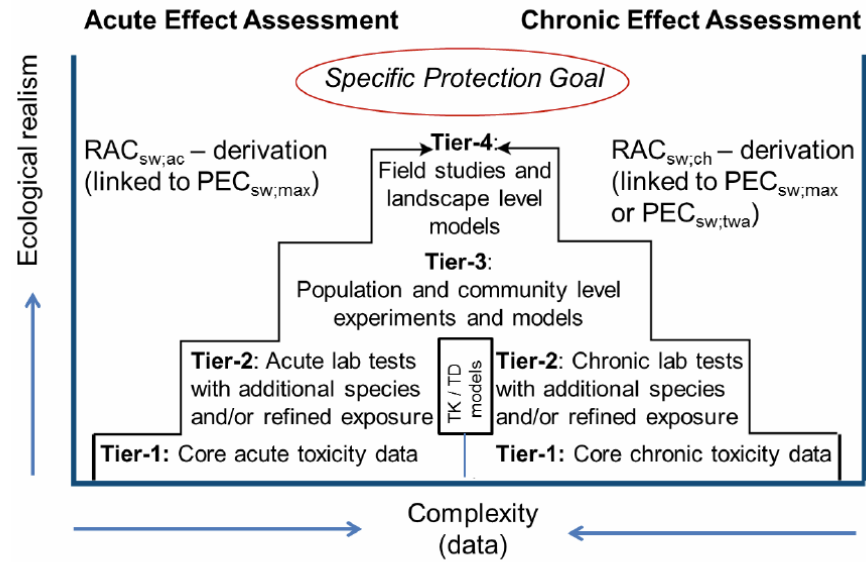
- Circulation et transformations biogéochimiques.
- Modalités de contamination des organismes : mécanismes de pénétration, de distribution, de métabolisation et d'excrétion.
- Effets sur les organismes.
- Effets sur les populations, les communautés et les processus écologiques.

Evaluation du risque éco(toxico)logique

- Qu'est-ce que c'est ?
 - **Risque** = **probabilité** que l'introduction d'un **contaminant** (d'origine naturelle ou anthropique) dans un écosystème **produise des effets néfastes** sur les différents compartiments de cet **écosystème** (US EPA, 1998 ; ECB, 2003).
 - **Evaluer le risque** pour **mesurer** et **minimiser** l'exposition de l'environnement à la substance considérée
- Quand et comment pour les pesticides ?
 - Avant mise sur le marché = A.M.M.
(règlement (CE) n° 1107/2009)
 - Après commercialisation (*e.g.*, suivi post-homologation, phytopharmacovigilance)

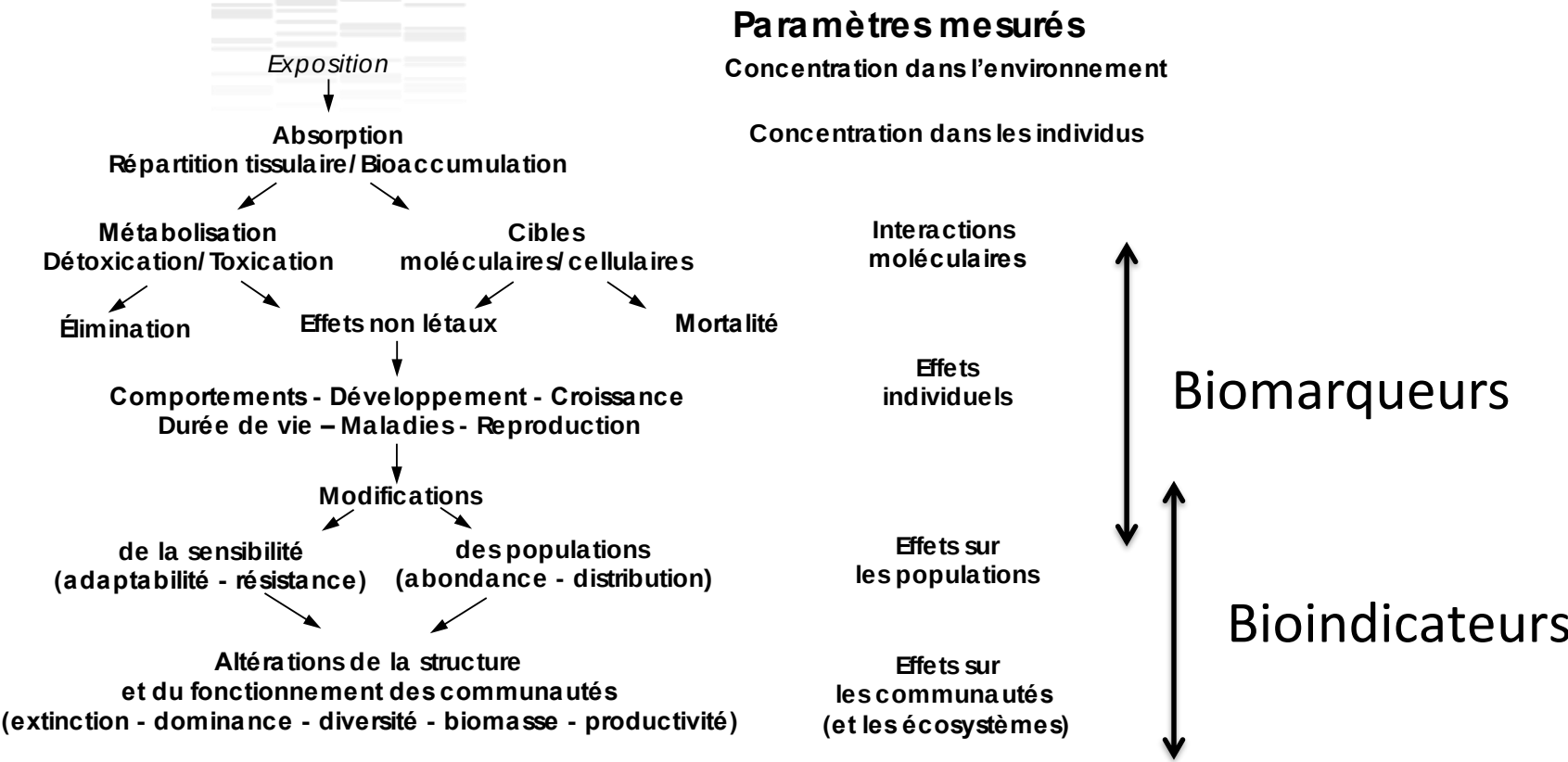
*A priori vs.
a posteriori*

Evaluation du risque éco(toxico)logique *a priori*



(EFSA PPR Panel, 2013)

Evaluation du risque éco(toxico)logique *a posteriori*



Evaluation *a posteriori* - Ecoépidémiologie



Robert Koch

- Relations effets-dose
- Concordance temporelle
- Force, constance et spécificité de l'association
- Plausibilité biologique
- Cohérence et constance des preuves expérimentales
- Analyse de mécanismes alternatifs éventuels
- Prise en compte des incertitudes, des incohérences et des manques de données

=> Lien avec concepts
'One Health' – 'Ecosystem Health'

The Environment and Disease: Association or Causation?

by Sir Austin Bradford Hill CBE DSC FRCP(hon) FRS
(*Professor Emeritus of Medical Statistics,
University of London*) Proc. R. Soc. Med., 1965

La phytopharmacovigilance

- Mise en place dans le cadre de la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt du 13 octobre 2014 et confiée à l'ANSES
- Contamination des milieux, exposition et impacts sur les organismes vivants et les écosystèmes dans leur ensemble, ainsi que les phénomènes d'apparition de résistances => **détecter au plus tôt les signaux qui peuvent amener à prendre des mesures de prévention ou de limitation des risques liés aux PP**
- Trois piliers :
 - Collecte systématique et régulière d'informations produites par les organismes de surveillance et de vigilance déjà existants (CAP-TV, MSA-Phyt'attitude, ...)
 - Etudes *ad hoc* sur les effets indésirables des PP
 - Signalements des acteurs professionnels (titulaires AMM, fabricants, importateurs, etc.)

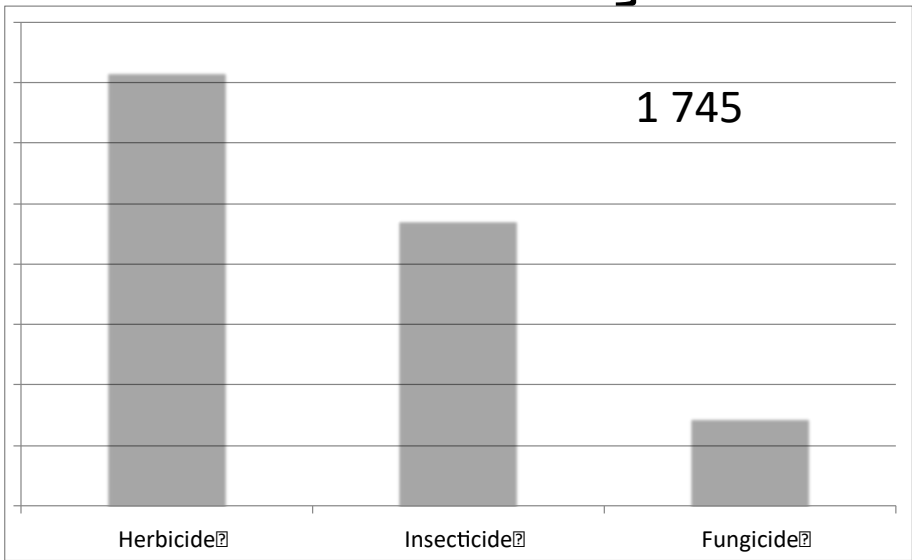
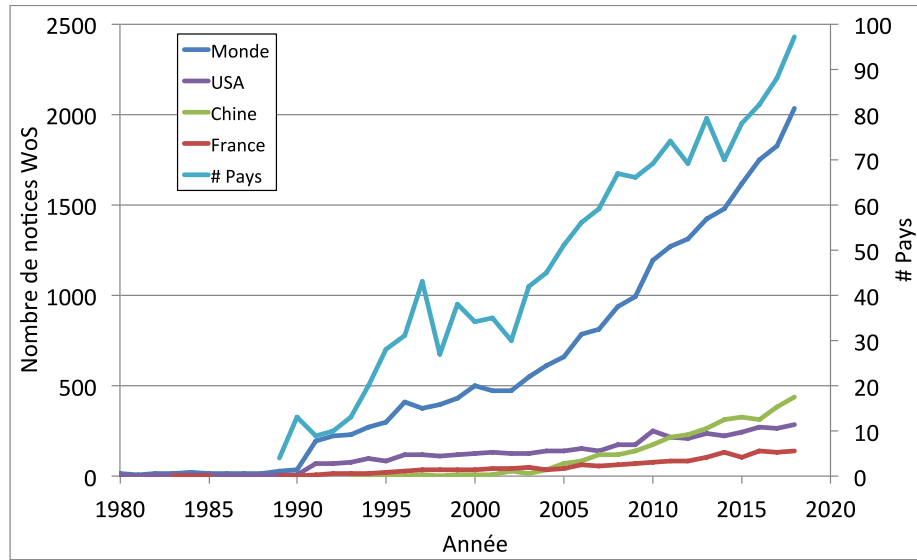
Le paysage de la recherche sur les pesticides

Une analyse (rapide) du WoS
(1956-2019)

$$TS=(\text{pesticid* or herbicid* or insecticid* or nematocid* or helminticid* or fungicid* or "pest* control*" or "weed* control*"}) = 251\,099$$
$$TS=(\text{ecotoxic* or toxicol* or pollut*}) = 470\,512$$

}

24 653



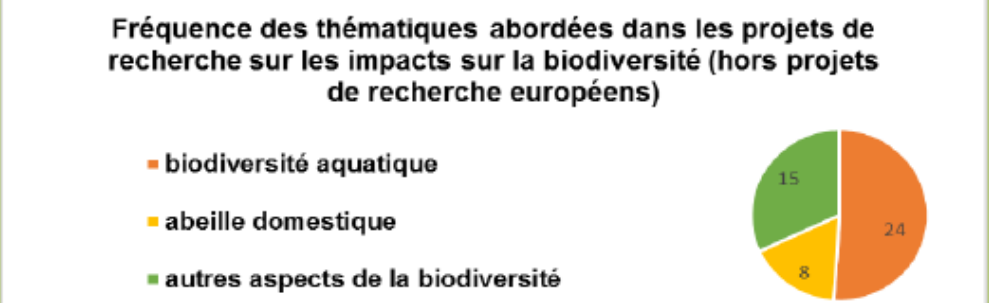
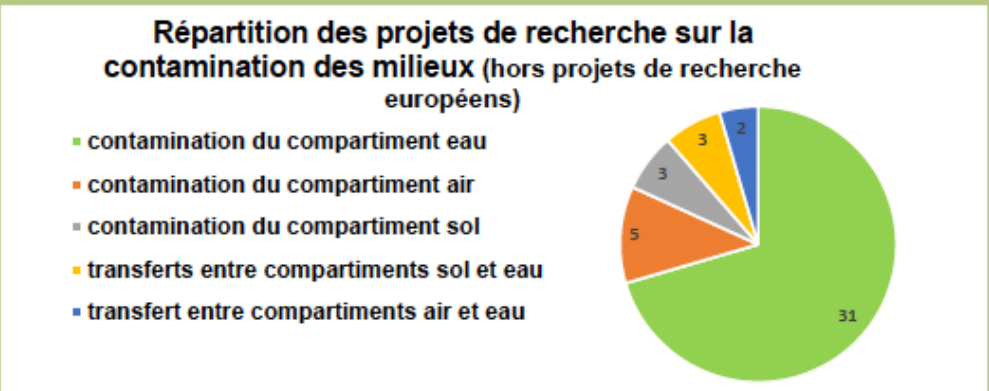
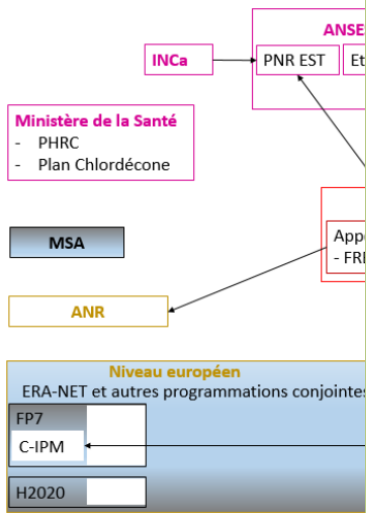
Atrazine, Diuron, Chlordécone, Glyphosate, Isoproturon, HCH/Lindane, Deltaméthrine, Chlorpyrifos, DDE, Imidaclopride, Endosulfan, HCB, Fipronil, AMPA, Sulcotrione, Alachlor

Le paysage de la recherche française sur les pesticides

Action CSORI Ecophyto
aux établissements

- 45 projets de recherche sur la **contamination des milieux**
- 46 projets de recherche sur **l'impact sur la biodiversité**.

programmes internes
(231 M€ Europe)



Environnement & Biodiversité

91 projets de recherche
Montant des subventions: 35,3 M€

(Courias et Carpentier, 2017)

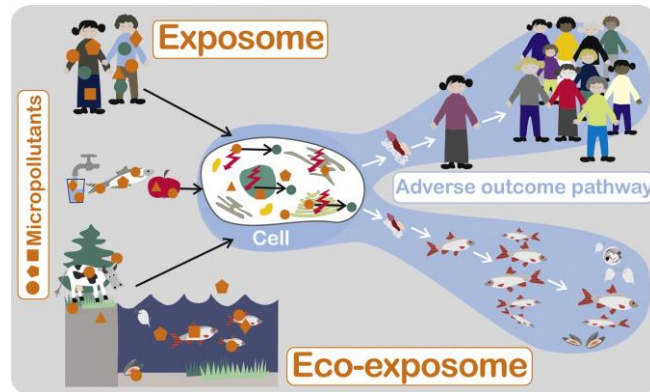
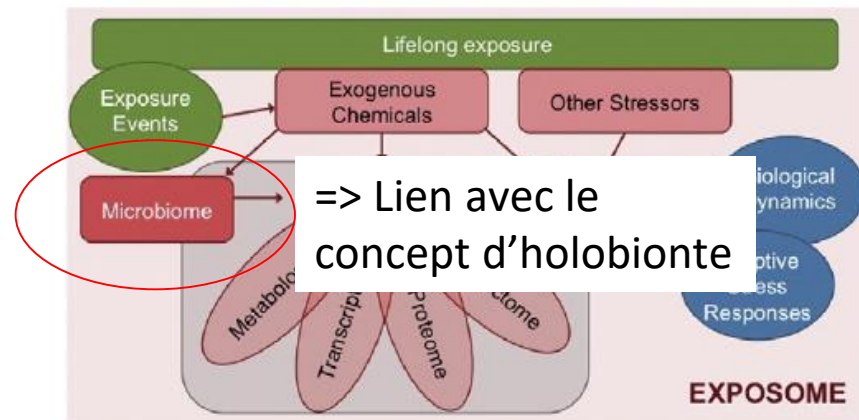
github.io/ecophyto/



3. Exemples de fronts de science et avancées récentes

Caractériser l'exposition : l'ère de l'exposome

- **Exposome** : ensemble des **expositions** (chimiques, physiques, biologiques, psychologiques et sociologiques) qu'un individu peut connaître **tout au long de la vie, depuis la conception** ; comprend les facteurs liés au mode de vie (activité physique, comportement alimentaire, stress, etc.; Wild, 2005) .
- **Eco-exposome** (NRC, 2012) : prise en compte de la dimension environnementale, y compris pour l'analyse de l'exposome des organismes non humains.

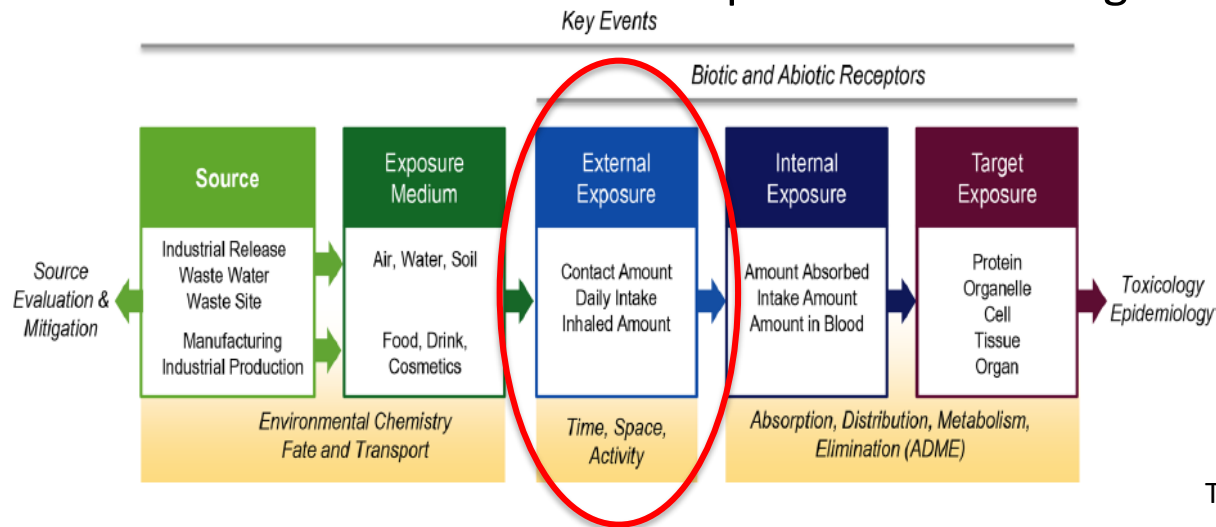


Escher *et al.*, 2017

Développement de schémas mécanistes d'exposition :

Aggregated Exposure Pathways – AEP

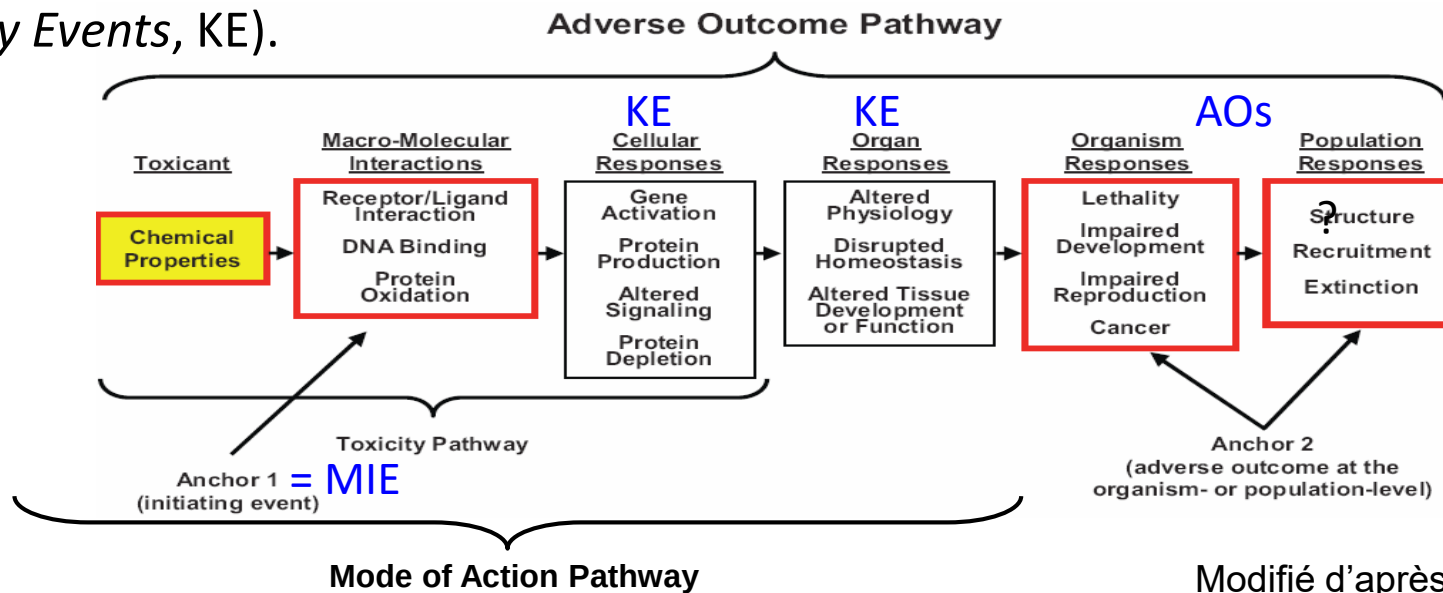
Assemblage des connaissances sur les **processus** (biologiques, chimiques ou physiques) plausibles et avérés de manière empirique qui sont susceptibles d'intervenir entre l'introduction d'une substance dans l'environnement et sa concentration au niveau du site d'action correspondant dans l'organisme



Teeguraden *et al.*, 2016

Intégration des informations : l'exemple des *Adverse Outcome Pathways* (AOP)

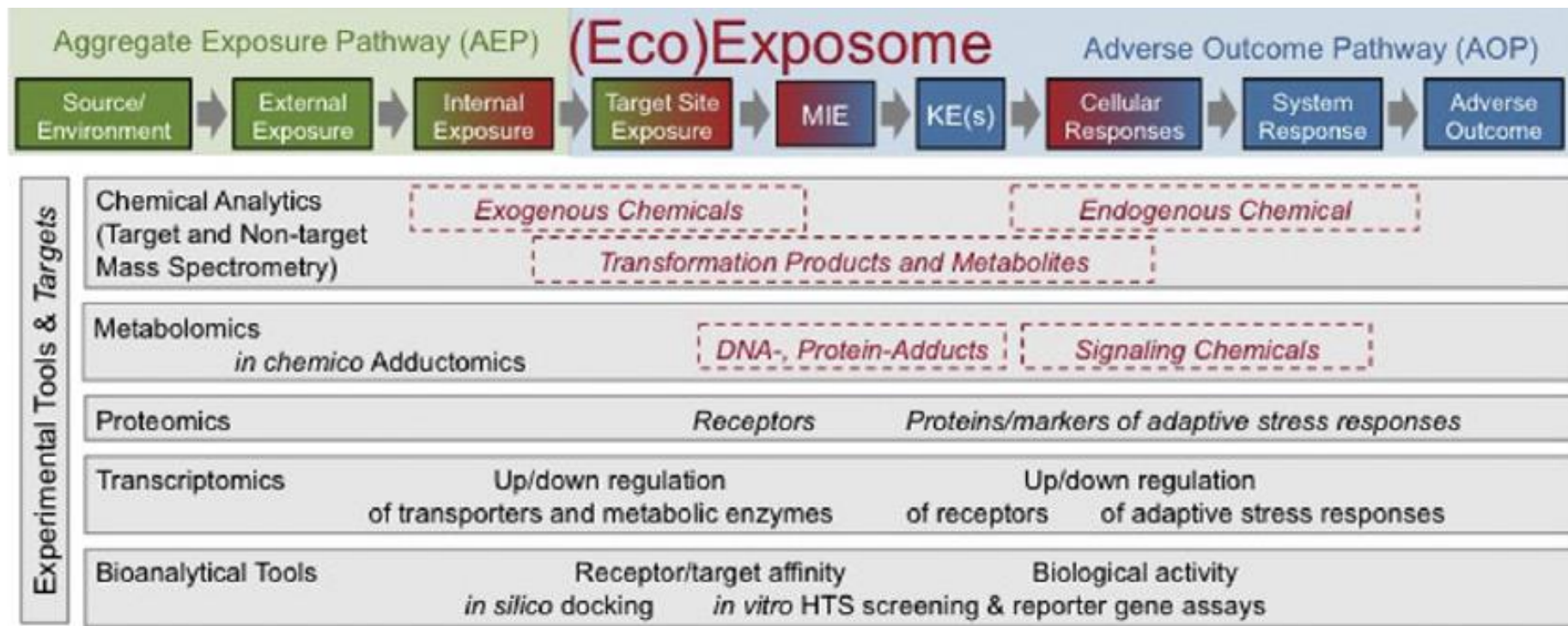
Assemblage des connaissances sur **le lien** entre un **événement moléculaire initiateur** (*Molecular Initiating Event*, MIE) et un **effet négatif** à un **niveau pertinent pour l'évaluation du risque** (*Adverse Outcome*, AO) via une séquence d'événements clés (*Key Events*, KE).



Communautés ?
Ecosystèmes ?

Modifié d'après Ankley et al., 2010

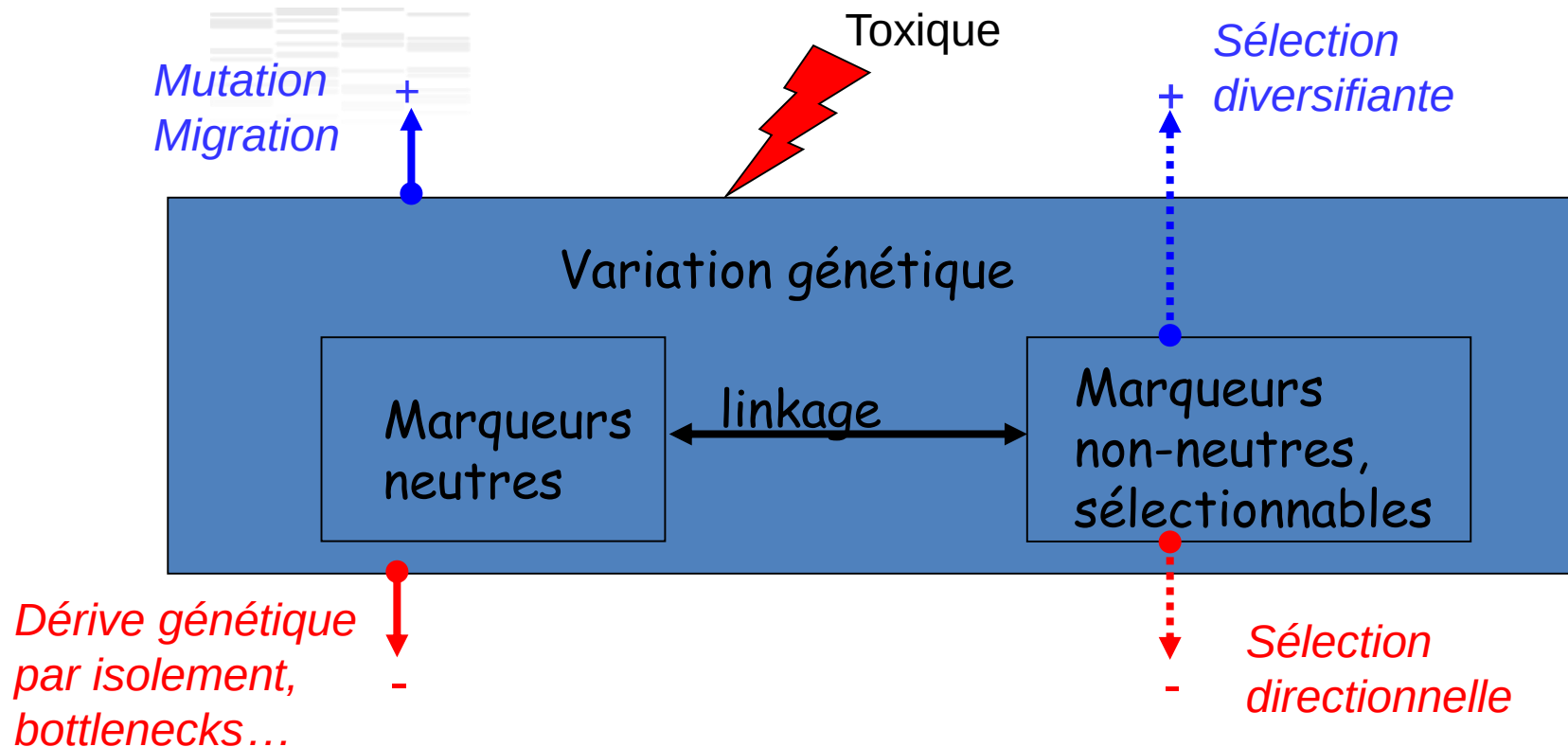
Mise en cohérence des outils (AEP+ AOP)



➤ Intégration des résultats => Biologie des systèmes

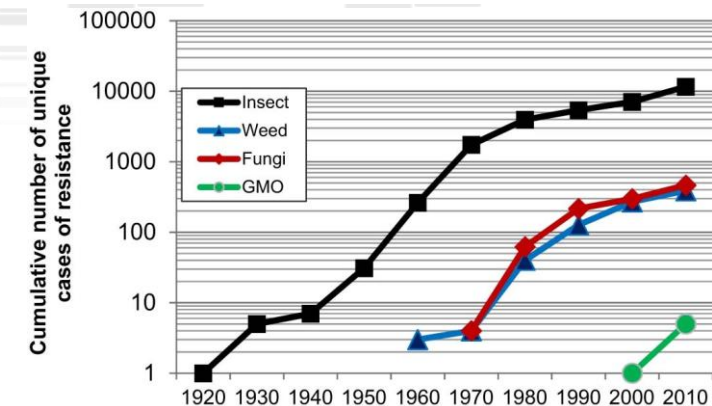
Escher et al., 2017

Effets possibles sur la variation génétique

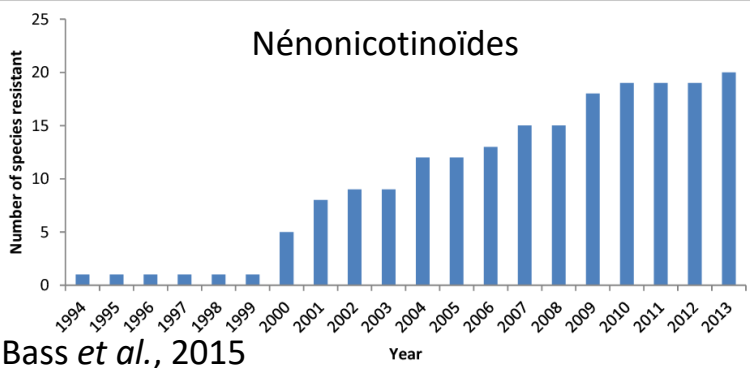


(d'après Coutellec, 2009)

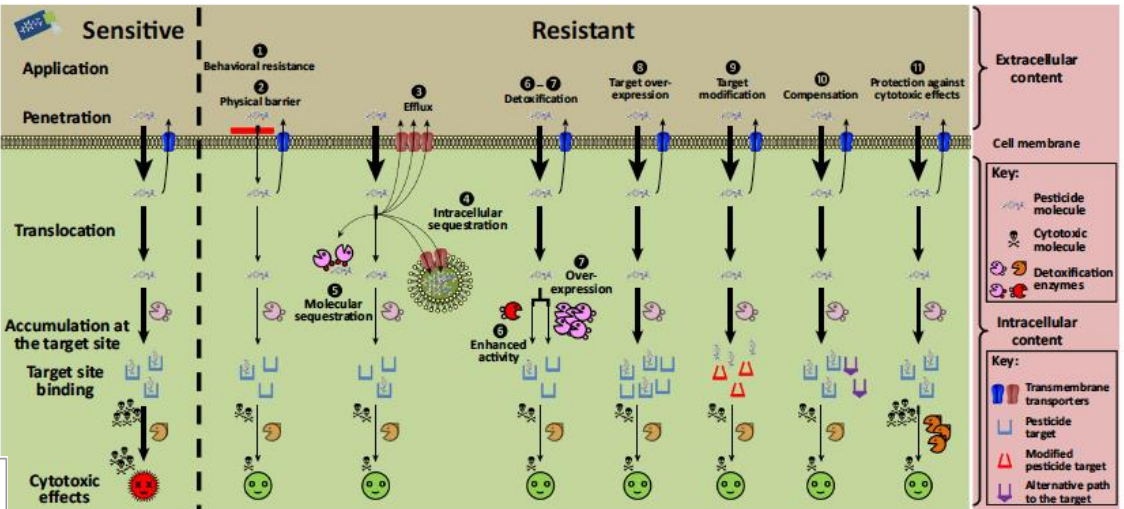
Un cas particulier : la résistance aux pesticides



Sparks et Nauen, 2015



Bass et al., 2015

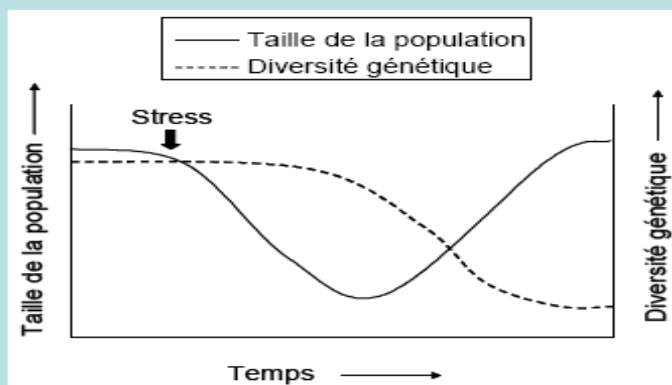


Réseau R4P, 2016

Trends in Plant Science

- ❖ Un phénomène sans cesse croissant mais aux mécanismes bien connus
- ❖ Une limite au déploiement de nouvelles molécules

Conséquences possibles d'une perte de diversité génétique

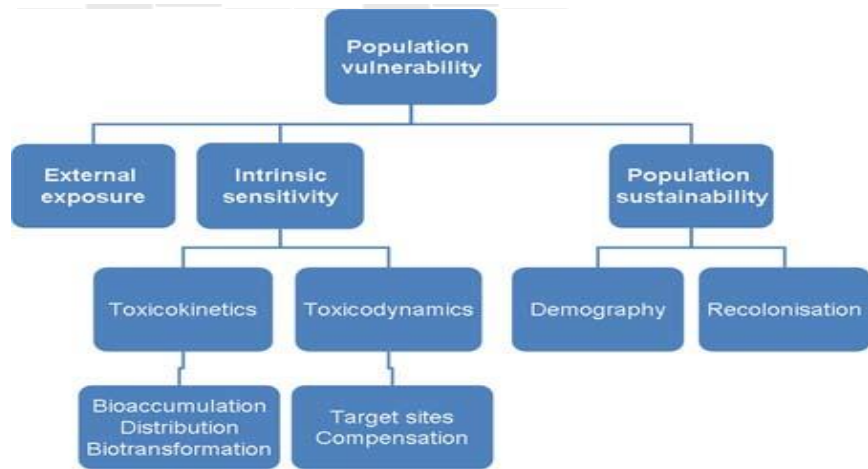


(d'après Bickham et al. 2000)

Une fois le stress levé, la diversité génétique n'est pas rétablie, même si l'effectif se reconstitue

1. Un effet démographique négatif peut entraîner la population vers une situation où la dérive et la consanguinité gouvernent l'évolution des allèles => risques d'extinction augmentés.
2. La baisse de diversité génétique dans les populations est le plus souvent associée à une réduction de leur adaptabilité à une variation environnementale ultérieure.

Traits et déterminants de la vulnérabilité des populations



Modèle conceptuel de la vulnérabilité
(Van Straalen, 1994)

- Bases de données de traits
- Mesures directes
- Proxy

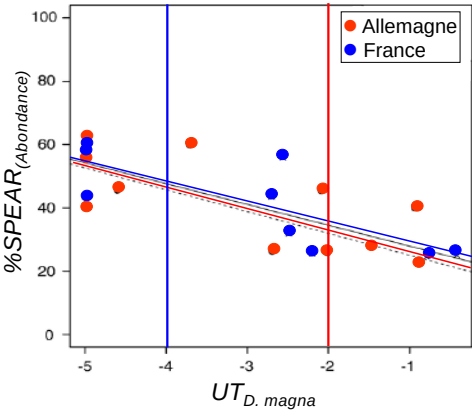
- ❖ **Exposition externe** : habitat, choix nourriture, longévité, évitement, ...
- ❖ **Sensibilité intrinsèque** : respiration, taille, surface corporelle, perméabilité tégumentaire, contenu en lipides, capacités de biotransformation, ...
- ❖ **Démographie** : temps de génération, durée de vie, voltinisme, ...
- ❖ **Recolonisation** : modalités de dispersion, locomotion, stades de résistance, ...

D'après Rubach *et al.*, 2011

Application aux écosystèmes aquatiques – métriques SPEAR

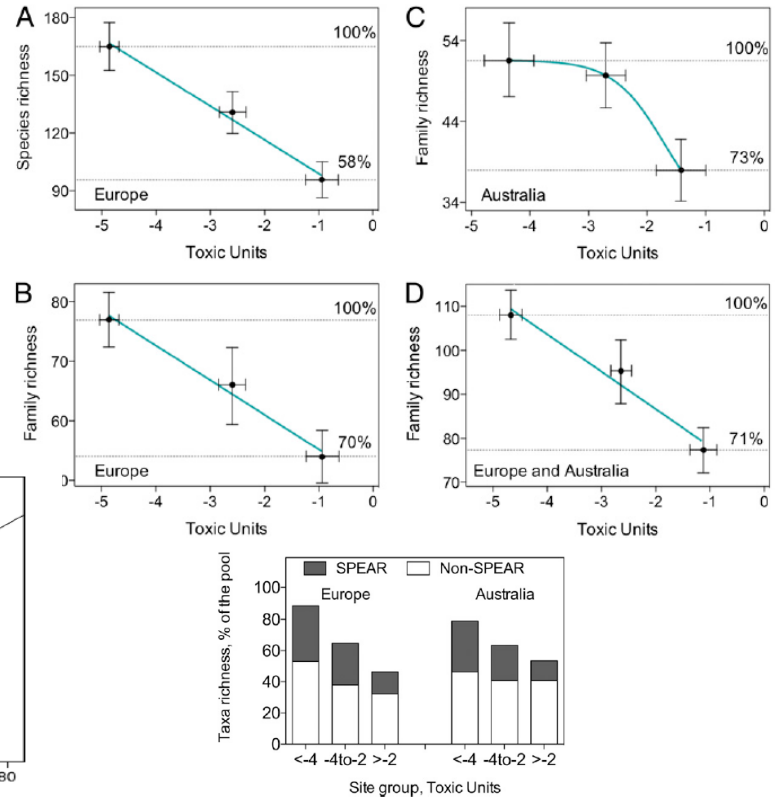
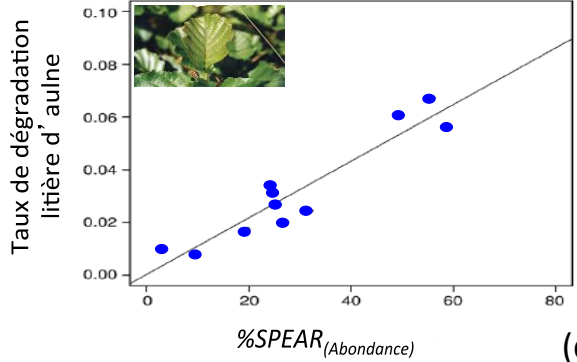
:

SPECIES NOT AT RISK		SPECIES AT RISK
Court	Temps de génération	Long
Forte	Capacité de migration	Faible
Non	Présence simultanée stades sensibles/pesticides	Oui
Non	Sensibilité	Oui



$$UT_{D. magna} = \max_{i=1}^n \left[\log \left(\frac{C_i}{CL_{50,i}} \right) \right]$$

- Référence : $UT_{D. magna} < -4$
- Faiblement contaminé : $-4 < UT_{D. magna} < -2$
- Fortement contaminé : $UT_{D. magna} > -2$

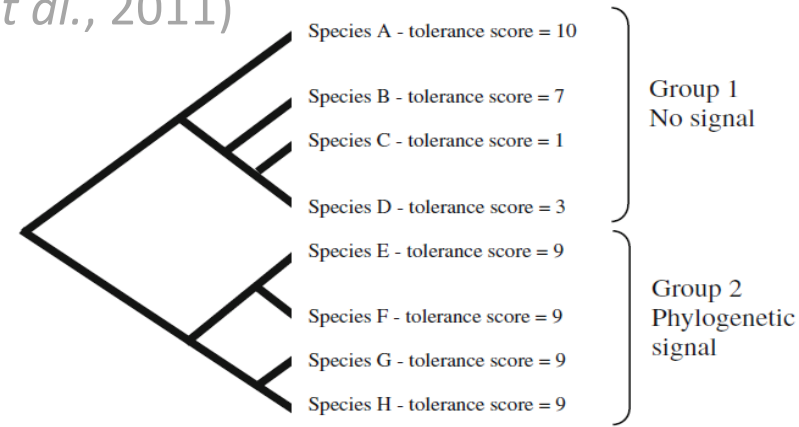


(d'après Schäfer *et al.*, 2007 ; Beketov *et al.*, 2013)

Prise en compte de l'histoire évolutive des espèces

- Existence d'un signal phylogénétique dans la sensibilité aux toxiques/qualité du milieu
 - Diatomées/Herbicides (Larras *et al.*, 2014)
 - Poissons/Organophosphorés (Hylton *et al.*, 2018)
 - Amphibiens/Cu (Chiari *et al.*, 2015)
 - Insectes aquatiques/cadmium (Buchwalter *et al.*, 2008)
 - Ephéméroptères/qualité de l'eau (Carew *et al.*, 2011)

- ⇒ Représentativité espèces modèles
- ⇒ Prédiction de la sensibilité d'espèces difficiles à utiliser pour des tests
- ⇒ Analyse des bases de la différence de sensibilité entre espèces





Conclusion - Quelques priorités pour le futur

Quelques priorités pour le futur (1/3)

- Exposition :
 - Données à haute résolution spatiale et temporelle
 - Identification de '*hot spots*' de contamination
- Effets :
 - Amélioration des méthodes d'analyse *in silico*.
 - Projection des conséquences des effets sur la dynamique des populations et des communautés => AEP-AOPs.
 - Traits et sensibilité des espèces.
 - Dimensions évolutives (phylogénie, effets micro-évolutifs, ...).
 - Interactions avec microbiotes (*e.g.*, abeille, lombriciens, plantes, ...).

Quelques priorités pour le futur (2/3)

- Effets :
 - Problématique des mélanges :
 - ✓ Fréquence et l'importance de l'écart aux modèles actuels d'analyse des mélanges (*Concentration addition/Independent action*).
 - ✓ Identification des substances responsables de la toxicité des mélanges (*'mixture toxicity drivers'*).
 - Impacts du changement climatique : modifications des usages, modifications écodynamique des contaminants, biologie des organismes, ...
 - Effets sur les services écosystémiques
 - Effets sur la dynamique des écosystèmes (*tipping point ?*)

Quelques priorités pour le futur (3/3)

- Dispositifs d'observation et d'expérimentation à long terme
=> RECOTOX.
- Approches inter- et transdisciplinaires.
- Liens avec problématiques *One Health – Eco Health*
- Améliorer la communication sur le risque écotoxicologique vers différents publics.
- Replacer la problématique dans le cadre plus général d'une vision systémique des politiques publiques (eau, agriculture, bioéconomie, ...).

Merci pour votre attention

