

La méthode PICT (Pollution-Induced Community Tolerance), un outil complémentaire pour l'évaluation du risque et le biomonitoring des pesticides ?

Annette Bérard, Joan Artigas, C Leboulanger, Soizic Morin, Christian Mougin, Stéphane Pesce, Sabine Stachowski-Haberkorn

▶ **To cite this version:**

Annette Bérard, Joan Artigas, C Leboulanger, Soizic Morin, Christian Mougin, et al.. La méthode PICT (Pollution-Induced Community Tolerance), un outil complémentaire pour l'évaluation du risque et le biomonitoring des pesticides ?. 2021. hal-03402786

HAL Id: hal-03402786
https://hal.inrae.fr/hal-03402786

Submitted on 25 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Réseau d'écotoxicologie terrestre et aquatique

Fiche thématique N°35 - Octobre 2021

La méthode PICT (Pollution-Induced Community Tolerance), un outil complémentaire pour l'évaluation du risque et le biomonitoring des pesticides ?

Introduction

Le concept du PICT – La méthode PICT (Pollution- Induced Community Tolerance) proposée par Blanck et al., (1988) est basée sur l'hypothèse qu'une communauté biologique préalablement soumise à la pression d'un toxique dans son environnement, sera plus tolérante à celui-ci. Une communauté biologique regroupe différents « composants », génotypes ou phénotypes, ayant une sensibilité différente vis-à-vis du toxique étudié. L'augmentation de la tolérance de la communauté résulte de plusieurs phénomènes induits par son exposition, dont l'adaptation et/ou l'acclimatation des populations, et/ou des changements dans la composition des espèces. Les organismes les plus sensibles, exposés au toxique à une concentration et pendant une durée suffisantes, sont directement éliminés ou ne sont plus concurrentiels et sont remplacés par des organismes plus tolérants, provoquant ainsi une succession induite par le toxique (TIS) (Blanck, 2002). La structure des peuplements est alors modifiée, et la communauté qui en résulte présente une tolérance supérieure au toxique, en comparaison à une communauté semblable mais n'ayant pas été préalablement exposée (témoin correspondant à la « ligne de base » de tolérance du milieu).

Concrètement, si l'on a le moyen de mesurer la sensibilité de cette communauté (préalablement exposée au toxique) à ce toxique, celle-ci devrait avoir une sensibilité moindre que celle attendue (i.e. celle des témoins). L'analyse de la diversité au sein de la communauté doit également montrer des modifications, pouvant conduire jusqu'à la disparition des taxons les plus sensibles.

Outre les intérêts de cette méthode pour étudier les processus écologiques et physiologiques de sélection et d'adaptation vis-à-vis d'un toxique, elle présente un atout fort pour l'évaluation du risque écotoxicologique à priori et à postériori : la mise en évidence de la relation de cause à effet entre l'exposition d'un contaminant dans le milieu (qu'il soit in situ ou dans le cadre d'expérimentations contrôlées) et les effets sur la communauté, intégrant la complexité structurelle et fonctionnelle du système étudié (Tlili et al., 2015).

Le PICT tient compte des différences de sensibilité des espèces et des interactions interspécifiques au sein de la communauté, alors que celles-ci ne sont pas prises en compte dans les tests monospécifiques (McClellan, et al., 2008).

Le principe du PICT est d'échantillonner une communauté préalablement exposée à un toxique de manière chronique in situ ou expérimentalement (*phase de sélection*), et de l'exposer à ce même toxique dans le cadre d'un bioessai contrôlé, afin d'en mesurer la sensibilité (courbe dose-réponse, CE50 …), et de la comparer à celle d'une communauté comparable issue d'un milieu non contaminé considéré comme témoin (*phase de détection*). Parallèlement à ces mesures de sensibilité, les communautés comparées sont caractérisées par leur structure taxonomique (et/ou fonctionnelle).

Cette méthode a été appliquée dans divers contextes, marins, d'eaux douces, terrestres, principalement sur les communautés microbiennes (phyto et bactérioplancton, biofilms autotrophes et hétérotrophes, communautés microbiennes autotrophes et hétérotrophes de sédiments et de sols …). Les microorganismes présentent des temps de génération courts, favorisant les études sur la sélection, et de nombreux protocoles éprouvés permettent de mesurer diverses activités globales à l'échelle des communautés, favorisant la pratique de bioessais pour évaluer la tolérance induite. De plus rares travaux impliquent des macroorganismes dans des études PICT (*Millward et al., 1995,* Courtney L.A. & Clements, 2000, *Knopper et al., 2002, Oguma et al., 2017*), dont une étude très récente qui a mis en

évidence un phénomène d'acquisition de tolérance de communautés zooplanctoniques exposées au glyphosate (Hébert et al., 2021).

La Méthode (Fig.1)

1- La phase de sélection : au cours de laquelle la communauté biologique est soumise de manière chronique au toxique dans le milieu. C'est lors de cette phase que le contact entre le contaminant et la communauté doit être établi (biodisponibilité avérée), et que la durée d'exposition doit être suffisante pour induire un phénomène de sélection. Notons qu'en contexte expérimental (microcosmes, ou enclos), les paramètres de durée, d'application et de niveau d'exposition au toxique étudié sont contrôlés. Ces paramètres contrôlés ainsi que le choix entre des systèmes ouverts ou clos (permettant ou non les échanges d'organismes de la communauté étudiée avec l'extérieur) impacteront le processus de sélection et le rétablissement éventuel des communautés étudiées (Lambert et al., 2012, Blanck, 2002).

L'échantillonnage des organismes qui seront testés lors de la phase de détection est primordial. Il doit être le plus représentatif possible afin de saisir l'histoire de contamination chronique de la communauté étudiée. Pour les milieux aquatiques, différents systèmes de colonisation de biofilms sur des supports artificiels ont été développés (Blanck, 1985) : ici encore la durée de colonisation (15 jours à 3 semaines généralement) impacte cette phase de détection. Les échantillonnages des communautés aquatiques in situ peuvent poser le problème de l'ignorance de leur origine (en particulier pour le plancton susceptible de se déplacer avec les courants par exemple, mais la question se pose aussi pour les biofilms) et donc de leur exposition au toxique (Dorigo et al., 2004). L'échantillonnage des communautés microbiennes des sols et des sédiments nécessite parfois de passer par une phase d'extraction des organismes de la matrice complexe (Bérard et al., 2004), avec des biais de sélection possibles. Aucune méthode d'échantillonnage n'est totalement satisfaisante (constat général en écologie), il est important de prendre en compte ces éventuels biais dans l'interprétation des mesures lors de la phase de détection.

2-La phase de détection : au cours de laquelle la communauté biologique échantillonnée (ayant subi une exposition chronique préalable), est soumise de manière aigue au toxique incriminé dans le cadre de bioessais contrôlés. Le point final de mesure de l'effet toxique (endpoint) est généralement adapté au mode d'action du toxique incriminé et peut cibler certaines communautés microbiennes (exemple : phototrophes versus hétérotrophes). Divers endpoints ont été utilisés dans le cadre d'études PICT : en particulier l'incorporation du ^{14}C (Blanck et al., 1988 Bérard et Benninghoff, 2001, Schmitt-Jansen et Altenburger*, 2005)* et la fluorescence in vivo (Seguin et al. 2002), la fluorimétrie PAM (Schmitt-Jansen et *Altenburger*, 2008, Magnuson et al., 2012), la synthèse des sulfolipides membranaires (Nyström et al., 2000), et des endpoints ciblant les communautés hétérotrophes tels que l'incorporation de la thymidine et de la leucine tritiées (Demoling et al., 2009), les éco-plaques (type Biolog, Rutger et al., 1999), la respiration microbienne (Dorigo et al., 2007, Tlili et al., 2011, Wakelin et al., 2014), les activités enzymatiques (Tlili et al., 2010, Bonnineau et al., 2013), l'oxydation potentielle de l'ammonium (Gong et al., 2002) ou du méthane (Seghers et al., 2003).

3-La validation : la validation de l'hypothèse PICT est généralement réalisée avec des caractérisations de la structure des communautés testées (structure taxonomique et/ou fonctionnelle), ainsi que par des mesures chimiques de la contamination des milieux étudiés. L'induction de tolérance par l'exposition des communautés aux polluants repose donc sur i) un historique de contamination préalable du milieu étudié (monde réel ou expérimental), ii) une modification de la structure des communautés (biodiversité et abondance des organismes) et iii) une diminution de la sensibilité à court terme lors d'une exposition expérimentale au(x) polluant(s).

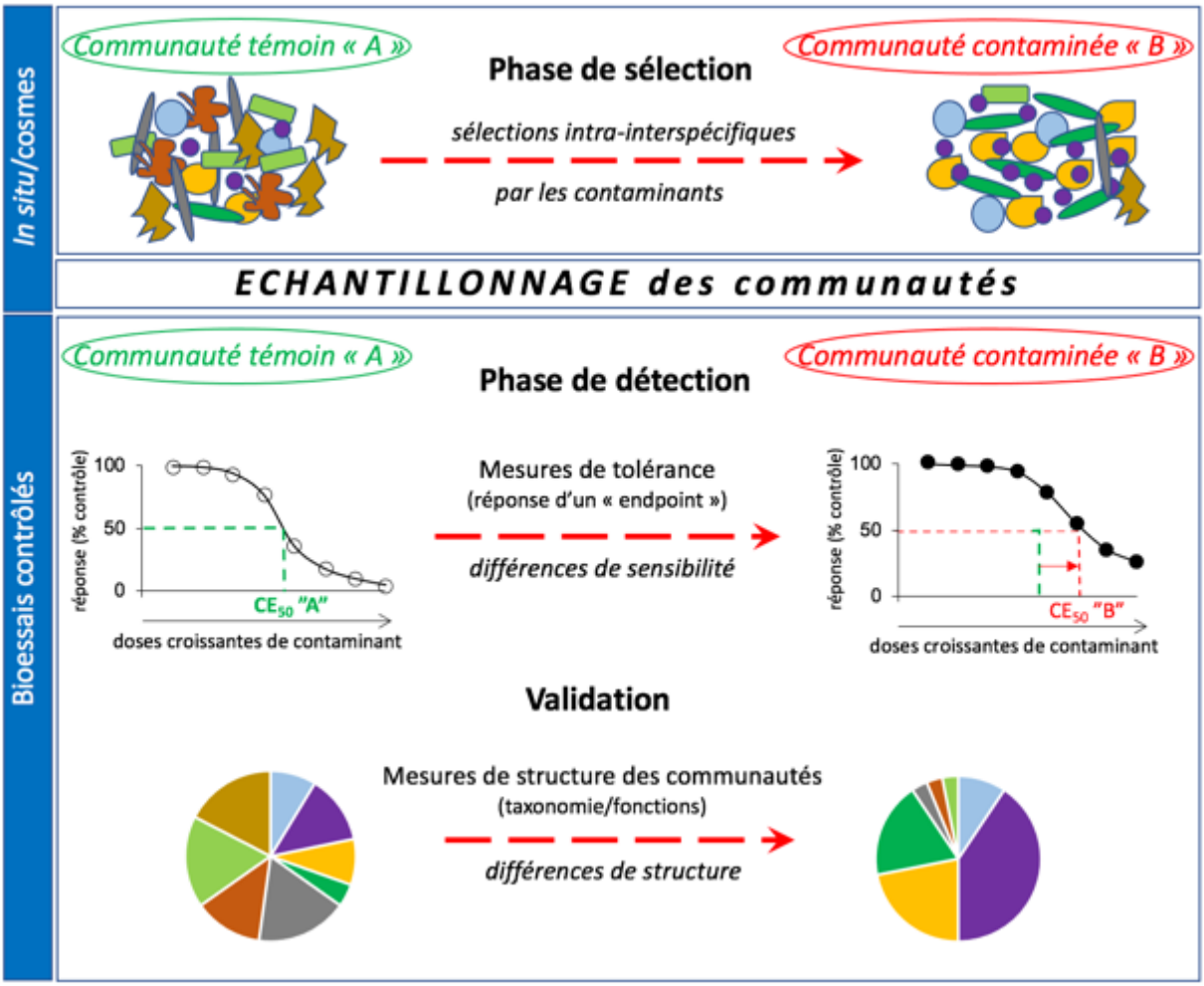


Figure 1. *Les deux phases de l'approche PICT : sélection et détection. Durant la phase de sélection, des sélections inter- et intraspécifiques se produisent sous l'effet de l'exposition de la communauté (B) au toxique (restructuration de la communauté par la disparition des taxons sensibles et la dominance des taxons tolérants). Durant la phase de détection, la tolérance de la communauté échantillonnée est quantifiée en laboratoire au moyen de bioessais à court terme. Les réponses de paramètres fonctionnels (« endpoints ») aux concentrations croissantes du polluant testé sont mesurées, ce qui permet d'établir des courbes concentration-réponse pour la communauté « témoin » (A) et la communauté sélectionnée par le toxique (B). La tolérance est ensuite exprimée sous la forme d'une concentration effective (exemple EC50). La différence entre les valeurs ECx obtenues pour les deux communautés permet de quantifier le PICT. Parallèlement aux mesures de tolérance, la composition des deux communautés est évaluée et comparée pour valider l'hypothèse d'une sélection intra- et interspécifique. (Modifié d'après Tlili et al., 2015).*

Applications de la méthode PICT aux contaminations par les pesticides

Une requête bibliographique sur l'application du PICT aux pesticides et au cuivre (requête : (Pesticid* OR herbicid* OR cui OR copper) AND 'pollution-induced community tolerance OR PICT) AND (alga* OR Cyanob* OR periphyt* OR phytoplankt* OR liche* OR microbi*) = 116 résultats initiaux), ainsi que des articles connus par les experts, ont permis de sélectionner 68 études. Les premiers travaux sur le concept et la méthode PICT ont été élaborés par Blanck et al. (1988) en contexte de contamination par l'arsenic, les études PICT appliquées au PPP se sont développées à partir des années 2000 (avec un maximum de publications dans les années 2010).

Plus des 2/3 de ces études ont été réalisés en milieux aquatiques d'eau douce, seulement 13 % concernent les milieux marins et 20% les sols. 70% des études en milieux aquatiques ont pour modèle

biologique les biofilms et le périphyton (en particulier en eau douce), les 30% des études restants sont principalement réalisés sur le plancton. Très peu d'études ont été réalisées sur les sédiments.

La majorité (53%) des toxiques étudiés sont les herbicides : principalement des inhibiteurs du PSII tels que les triazines (essentiellement atrazine, mais aussi prométryne, terbuthylazine, simazine), et des urées substituées (essentiellement le diuron et l'isoproturon) ; de rares études ont abordé la tolérance au 2,4-D (Zabaloy et al., 2010) et au glyphosate (Allegrini et al., 2015). Une seule étude à notre connaissance a abordé la tolérance vis-à-vis de métabolites d'herbicide (du diuron, Pesce et al., 2010). Les études sur le cuivre représentent plus de 43% des études PICT, il y a très peu d'études appliquées à la tolérance aux fongicides organiques (4%, tébuconazole et azoxystrobine).

C'est aussi en eaux douces que l'on retrouve la plus grande diversité de familles de molécules testées (en milieu marin, les biocides-antifouling ont aussi été étudiés, dont certains comme l'Irgarol sont des triazines, mais ne sont pas repris ici), alors que les études sur les sols sont aux 2/3 axées sur le cuivre (le tiers restant concerne les herbicides, nous n'avons pas trouvé d'études sur des fongicides organiques). Notons que dans les sols la méthode PICT est très majoritairement appliquée aux contaminations par les métaux (contaminations industrielles et liées aux épandages de déchets organiques, Brandt et al., 2010) et depuis les années 2010, à la tolérance aux antibiotiques en interaction avec ces contaminations métalliques (Berg et al., 2010, mais ces travaux ne sont pas repris ici). Si 80% des études sur sol ont été réalisées *in situ*, près des 2/3 des études aquatiques ont été réalisées en milieux contrôlés. On peut rapprocher cette constatation avec le peu de molécules testées : beaucoup d'études sont réalisées avec des molécules modèles (substances actives seules). Si ces molécules toxiques présentent une réalité de contamination (molécules retrouvées dans les sites étudiés par les laboratoires de recherche), elles sont aussi utilisées dans le cadre d'études en milieux contrôlés pour comprendre des processus écotoxicologiques de sélections/acquisition de tolérance et l'influence des variables du milieu, autres que les toxiques.

On peut citer l'exemple de l'observatoire de l'Ardières-Morcille (bassin versant viticole du Beaujolais), étudié depuis près de 20 ans (Gouy et al., 2021) et qui a permis de développer la méthode PICT en prenant comme molécules modèles deux phytosanitaires présents dans le bassin versant et la rivière : le diuron et le cuivre. Les premières études *in situ* ont permis de montrer les acquisitions de tolérance au diuron et au cuivre, associées aux changements de structure taxonomique des communautés périphytiques échantillonnées en amont et en aval de la rivière (Dorigo et al., 2007, Pesce et al. 2010), en établissant le lien de cause à effet de l'exposition. Des manipulations *in situ* de transplantation de périphyton de l'amont vers l'aval de la rivière ont confirmé ces acquisitions de tolérance, mais aussi des pertes de tolérance des communautés transplantées de l'aval vers l'amont, avec des réponses différentes selon le contaminant étudié (probablement liées au fait que les biofilms avaient initialement internalisé du cuivre et non du diuron). Cependant après 7 semaines d'acclimatation, la tolérance (envers le diuron et le cuivre) et la composition taxonomique des biofilms transplantés n'avaient toujours pas retrouvé les caractéristiques des communautés de l'amont de la rivière (Dorigo et al., 2010). Associé à ces mesures de contamination de l'eau et de transplantations sur le terrain, des expérimentations au laboratoire ont permis de préciser certains phénomènes associés à l'acquisition de tolérance et aux trajectoires de sélection (Tlili et al., 2010, Lambert et al., 2012). Les facteurs environnementaux (température) susceptibles d'impacter la tolérance des communautés aux contaminants (Lambert et al., 2017) et ceci de manière différente selon les communautés et leurs fonctions ont également été étudiés (Pesce et al., 2018). Enfin, le diuron ayant été interdit en 2008, une étude PICT *in situ* réalisée sur trois ans (2009-2011) à un rythme mensuel a permis de valider la méthode en conditions réelles, mettant en évidence la restauration des communautés périphytiques de la rivière (Pesce et al., 2016). Ce genre de résultats a été obtenu sur le lac Léman ayant connu une décroissance de la contamination pélagique par l'atrazine et le cuivre : des campagnes PICT ont été répétées mensuellement sur le phytoplancton durant une année à 12 ans d'intervalle (Larras et al. 2016)

Ces exemples soulignent l'intérêt de la méthode PICT comme outil de biomonitoring. Cependant, cet outil écotoxicologique, basé sur des processus écologiques et fonctionnels des communautés dans leurs milieux contaminés, n'est actuellement pas appliqué en routine pour l'évaluation du risque.

Des verrous à débloquer

Pour pouvoir utiliser la méthode PICT dans le cadre d'évaluation du risque *a priori* et *a posteriori* induit par les pesticides, il est nécessaire de dépasser des verrous et de poursuivre un cadrage de la méthode (Tlili et al., 2015).

-La ligne de base et facteurs confondants

In situ, la ligne de base de tolérance (témoin) est généralement acquise sur une communauté prélevée dans une zone non (ou faiblement) contaminée par le toxique incriminé, mais comparable à la communauté exposée au toxique. Il est donc nécessaire d'échantillonner et de caractériser cette communauté témoin à chaque mesure PICT. Si l'objectif envisagé est de surveiller à plus large échelle une région selon ses contaminations en pesticides, trouver des sites témoins est complexe et définir une ligne de base plus générique devient un enjeu. Pour cela, il faut connaitre la variabilité de cette ligne de base de tolérance qui peut être influencée par diverses variables environnementales. Par exemple, une étude européenne sur la tolérance des biofilms de rivières vis-à-vis du zinc a mis en évidence de grandes variabilités de tolérance de base. Des outils de modélisation ont permis de caractériser les principaux paramètres impliqués dans cette variabilité, liés à la biodisponibilité du métal (Blanck et al., 2003). Une autre approche très récente, appliquée au sol, a montré avec des régressions multiples qu'il était possible de définir une ligne de base de tolérance au cuivre à partir d'une équation prenant en compte les caractéristiques physico-chimiques du sol et le type de matériau parental (Campillo-Cora et al., 2021). Cette équation dépend du contaminant étudié et de « l'endpoint » utilisé. Il n'existe pas à notre connaissance de travaux comparables sur des tentatives de définition de ligne de base pour estimer la tolérance induite par des contaminations organiques de type pesticides, mais les travaux expérimentaux et de suivis saisonniers in situ révélant certaines variables environnementales influençant cette tolérance de base (Pesce et al., 2018), montrent qu'il est possible d'aller dans cette direction. Dans ce sens, il est nécessaire de poursuivre en parallèle des travaux expérimentaux pour préciser les facteurs susceptibles d'être confondants dans l'évaluation de la tolérance (Blanck, 2002).

-Les mélanges de contaminants

Nous avons vu que la plupart des études PICT étaient focalisées sur un ou deux contaminants. Cependant, les milieux contaminés le sont généralement de manière multiple et non connue, et les pesticides présents dans le milieu sont accompagnés de leurs produits de dégradation. Par ailleurs, plusieurs études ont montré qu'il existait des phénomènes de cotolérance (un contaminant chronique pouvant induire une tolérance à un autre contaminant) entre différents contaminants et que les bioessais PICT ne pouvaient pas les discriminer : par exemple, Knauer et al. (2010), ont montré expérimentalement des phénomènes de cotolérance entre trois herbicides inhibiteurs du PSII, l'atrazine, le diuron et l'isoproturon avec des intensités différentes selon l'herbicide à l'origine de la pression de sélection. Une étude originale (Seghers et al., 2003) ciblée sur les méthanotrophes de sols contaminés par l'atrazine et le métolachlore (traitements sur 20 ans avec 0,75 kg et 2 kg respectivement /ha /an), a mis en évidence une tolérance accrue au 2,4-D (utilisé dans le bioessai PICT comme inhibiteur de l'oxydation du méthane par les microorganismes) de ces communautés préexposées à l'atrazine et au métolachlore, qui pourtant n'ont pas d'effets aigus à court terme (60 µg/ g sol) sur la capacité d'oxydation du méthane des communautés microbiennes.

Dans le cadre du suivi des milieux multicontaminés, on ne peut matériellement pas tester de nombreuses molécules avec l'outil PICT. En ce sens la cotolérance pourrait constituer un avantage, l'approche PICT pouvant être envisagée avec des molécules modèles de groupes chimiques

sélectionnées sur la base de leurs propriétés de cotolérance. Ce type d'approche permettrait de renseigner l'exposition de l'écosystème vis-à-vis de classes de polluants. Pour cela il est nécessaire de connaitre les mécanismes induisant la cotolérance (molécules ayant le même mode d'action et/ou induisant des modes de détoxification comparables ?). C'est en multipliant les études dans divers contextes de contaminations pesticides, associant des mesures PICT à une surveillance chimique ; en développant des études expérimentales (normalisées), permettant de tester diverses molécules ; et en associant ces observations à des approches écotoxiques in silico (Traoré et al., 2017), que nous pourrons faire avancer les connaissances sur cette question.

Une approche complémentaire proposée par Pesce et al. (2011) et Foulquier et al. (2015) est d'aborder la question de la multi contamination en testant directement ces mélanges réalistes dans les bioessais PICT. Des systèmes d'échantillonnage passif permettent de « récolter » la contamination du site et son historique, les solutions extraites obtenues sont d'une part, analysées chimiquement et d'autre part, testées sous forme de dilutions dans les bioessais appliqués aux communautés collectées dans le site impacté et dans le site témoin. Ce type d'approche permettrait d'établir la causalité entre l'exposition in situ à des mélanges complexes de micropolluants et les effets écotoxiques sur les communautés biologiques. Elle a été appliquée récemment avec succès dans le cadre de contaminations complexes de rivières en aval de stations d'épuration (Tlili et al., 2020). Ces deux approches associées permettraient d'augmenter la pertinence environnementale de la méthode PICT pour caractériser les milieux contaminés par les pesticides (Tlili et al., 2015).

La multi contamination interroge aussi sur le choix du(des) « endpoint(s) » de mesure de l'effet toxique à utiliser dans les bioessais PICT. Avoir un « endpoint » adapté au mode d'action du toxique incriminé est pertinent pour cibler un type de contaminant, mais il peut être limitant en contexte *in situ* de contaminations multiples et non connues (Blanck, 2002). Il est alors nécessaire de trouver un « endpoint » intégrateur de différents types de toxicité ou d'associer plusieurs « endpoints » pour tenir compte de la complexité à la fois des communautés étudiées, de la contamination chimique à laquelle elles ont été confrontées, et des impacts indirects possibles (Tlili et al., 2010, Tlili et al., 2020). Notons que Seghers et al. (2003) sont les seuls à notre connaissance à avoir « contourné » cette difficulté en utilisant dans leur bioessai PICT un herbicide un inhibiteur de l'oxydation du méthane (2,4-D) pour étudier la tolérance acquise de communautés ciblées (méthanotrophes) vis-à-vis d'autres types d'herbicides (Atrazine et métolachlore).

Conclusion, perspectives

Si des travaux plus récents ont permis des avancées, les conclusions de Tlili et al. (2015) restent d'actualité :

-Standardiser les mesures PICT, notamment les échantillonnages des communautés testées, ainsi que les bioessais eux-mêmes (Lambert et al., 2015, Vazquez-Blanco et al., 2021).

-Travailler la question de la ligne de base à des échelles spatiales larges. Par exemple par écorégions en s'inspirant par exemple des travaux réalisés sur les bioindicateurs normalisés (tels que les indicateurs basés sur les diatomées de rivière, Tison et al., 2005).

-Poursuivre les développements de méthodes sur les mélanges complexes de contaminations (voir ci-dessus) et avec des familles récentes de substances actives.

-Développer une plus grande variété (et stabiliser la standardisation) d'« endpoints » représentatifs des fonctions et des structures des écosystèmes microbiens. Dans ce sens, les avancées « omics » (Mahamoud Ahmed et al., 2020) et de chémotaxonomie devraient permettre de préciser nos connaissances sur les processus d'acquisition de tolérance et les acteurs de ces acquisitions et

contribuer à analyser la présence de gènes participant à la résistance et à la tolérance des communautés.

Peu d'outils existent ayant à la fois une pertinence écologique et écotoxicologique permettant d'établir le lien de causalité entre une contamination et la santé d'un écosystème. La méthode PICT reste un outil prometteur, et ces dix dernières années ont montré qu'il était utilisable dans le cadre d'expérimentations et de biomonitoring, y compris dans des milieux soumis à des contaminations complexes. L'enjeu de poursuivre son amélioration et de dépasser les verrous actuels afin d'en faire un outil opérationnel d'évaluation du risque des pesticides est fort.

Contacts

Annette Bérard[1], Joan Artigas[2], Christophe Leboulanger[3], Soizic Morin[4], Christian Mougin[5], Stéphane Pesce[6], Sabine Stachowski-Haberkorn[7]

[1]UMR 1114 EMMAH, INRAE/Avignon Université, Domaine Saint Paul, 228 Route de l'Aérodrome, 84914 Avignon Cedex 9

[2]UMR 6023 LMGE, CNRS/UCA, Campus Universitaire des Cézeaux, 1 Impasse Amélie Murat, 63178 Aubière

[3]UMR Marbec, Université de Montpellier/IRD/Ifremer/CNRS, Avenue Jean Monnet, 34200 Sète

[4]UR EABX, INRAE, 50 avenue de Verdun, 33612 Cestas cedex

[5]UMR 1402 ECOSYS, Université Paris-Saclay/INRAE/AgroParisTech, Route de Saint-Cyr, 78026 Versailles cedex

[6]UR RiverLy, INRAE, 5 Rue de la Doua, 69625 Villeurbanne Cedex

[7]Laboratoire Physiologie et Biotechnologie des Algues, Ifremer, Rue de l'Ile d'Yeu, 44311 Nantes Cedex 03

Pour en savoir plus

Cette fiche thématique a été rédigée dans le cadre de l'expertise collective « Phytopharmaceutiques Biodiversité Services Ecosystémiques ». Vous pouvez consulter concernant cette ESCo :

-La fiche thématique : https://www6.inrae.fr/ecotox/Productions/Fiches-thematiques/Fiche-thematique-N-29-octobre-2020

-La publication : Pesce, S., Mamy, L., Achard, A.L. et al. Collective scientific assessment as a relevant tool to inform public debate and policymaking: an illustration about the effects of plant protection products on biodiversity and ecosystem services. Environ Sci Pollut Res 28, 38448–38454 (2021). https://doi.org/10.1007/s11356-021-14863-w

A lire également : https://en.wikipedia.org/wiki/Pollution-induced_community_tolerance

Bibliographie citée

Allegrini, Marco, Zabaloy, María Celina, Gómez, Elena del V., 2015. "Ecotoxicological assessment of soil microbial community tolerance to glyphosate". *Science of The Total Environment. 533: 60–68.*

Bérard A., Benninghoff C., 2001. Pollution-Induced Community Tolerance (PICT) and seasonal variations in the sensitivity of phytoplankton to atrazine in microcosms. Chemosphere, Vol. 45 (4-5) : 427-437.

Bérard, A., Rimet, F., Capowiez, Y., Leboulanger, C. 2004. "Procedures for Determining the Pesticide Sensitivity of Indigenous Soil Algae: A Possible Bioindicator of Soil Contamination?". *Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 46 (1): 24–31.*

Blanck H. 2002. A critical review of procedures and approaches used for assessing pollution-induced community tolerance (PICT) in biotic communities. Human and Ecological Risk Assessment, 8, 1003–1034.

Blanck, H., Admiraal, W., Cleven, R. F. M. J., Guasch, H., van den Hoop, M. A. G. T., Ivorra, N., Nyström, B., Paulsson, M., Petterson, R. P., Sabater, S., Tubbing, G. M. J., 2003. "Variability in Zinc Tolerance, Measured as Incorporation of Radio-Labeled Carbon Dioxide and Thymidine, in Periphyton Communities Sampled from 15 European River Stretches". *Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 44 (1): 17–29.* doi:10.1007/s00244-002-1258-4. ISSN 0090-4341.

Blanck, Hans, Wangberg, S. A., Molander, S., 1988. "Pollution-Induced Community Tolerance – A New Ecotoxicological Tool." Functional Testing of Aquatic Biota for Estimating Hazards of Chemicals". *American Society for Testing and Materials. STP. 988: 219–230*

Blanck, H., 1985. "A simple, community level, ecotoxicological test system using samples of periphyton". Hydrobiologia. 124: 251–261

Brandt KK., Frandsen RJN., Holm PE., Nybroe O., 2010. Development of pollution-induced community tolerance is linked to structural and functional resilience of a soil bacterial community following a five-year field exposure to copper. Soil Biology & Biochemistry 42: 748-757 .

Bonnineau, C., Tlili, A., Faggiano, L., Montuelle, B., Guasch, H., 2013. "The use of antioxidant enzymes in freshwater biofilms: Temporal variability vs. toxicological responses". *Aquatic Toxicology. 136–137: 60–71.* doi:10.1016/j.aquatox.2013.03.009. ISSN 0166-445X.

Campillo-Cora, C., Soto-Gomez, D., Arias-Estévez, M., Baath, E., *2021.* "Bacterial community tolerance to Cu in soils with geochemical baseline concentrations (GBCs) of heavy metals: Importance for pollution induced community tolerance (PICT) determinations using the leucine incorporation method". *Soil Biology and Biochemistry. 155: 108157.* doi:10.1016/j.soilbio.2021.108157. ISSN 0038-0717

Courtney L.A., Clements W.H., 2000. Sensitivity to acidic pH in benthic invertebrate assemblages with different histories of exposure to metals. Journal of the North Ameri- can Benthological Society, 19, 112–127.

Demoling, LA., Bååth, E., Greve, G., Wouterse, M., Schmitt, H., 2009. "Effects of sulfamethoxazole on soil microbial communities after adding substrate". *Soil Biology and Biochemistry. 41 (4): 840–848.* doi:10.1016/j.soilbio.2009.02.001. ISSN 0038-0717.

Dorigo U., Bourrain X, Berard A, Leboulanger C, 2004. Seasonal changes in the sensitivity of river microalgae to atrazine and isoproturon along a contamination gradient. Sci. Total Environ, 318 : 101-114.

Dorigo, U, Leboulanger, C, Bérard, A, Bouchez, A, Humbert, JF, Montuelle, B., 2007. Lotic biofilm community structure and pesticide tolerance along a contamination gradient in a vineyard area. *Aquatic Microbial Ecology. 50: 91–102.* doi:10.3354/ame01133. ISSN 0948-3055.

Dorigo, U., *Berard,* A., *Rimet,* F., *Bouchez,* A., *Montuelle,* B., *2010.* In situ assessment of periphyton recovery in a river contaminated by pesticides. *Aquatic Toxicology. 98 (4): 396–406.* doi:10.1016/j.aquatox.2010.03.011. ISSN 0166-445X

Foulquier, A., *Morin,* S., *Dabrin,* A., *Margoum,* C., *Mazzella,* N., *Pesce,* S., *2015.* Effects of mixtures of dissolved and particulate contaminants on phototrophic biofilms: new insights from a PICT approach combining toxicity tests with passive samplers and model substances. *Environmental Science and Pollution Research. 22 (6): 4025–4036.* doi:10.1007/s11356-014-3289-6. ISSN 0944-1344.

Gong, P., *Siciliano,* S. *D., Srivastava,* S., *Greer,* CW., *Sunahara,* GI., *2002.* Assessment of Pollution-Induced Microbial Community Tolerance to Heavy Metals in Soil Using Ammonia-Oxidizing Bacteria and Biolog Assay. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 8 (5): 1067–1081.* doi:10.1080/1080-700291905828. ISSN 1080-7039.

Gouy, V., Liger, L., Ahrouch, S., Bonnineau, C., Carluer, N., Chaumot, A., Coquery, M., Dabrin, A., Margoum, C., & Pesce, S. (2021). Ardières-Morcille in the Beaujolais, France: A research catchment dedicated to study of the transport and impacts of diffuse agricultural pollution in rivers. Hydrological Processes, 35(10), e14384. https://doi.org/10.1002/hyp.14384

Hébert M-P, Fugère V, Beisner BE, da Costa NB, Barrett RDH, Bell G, Shapiro BJ, Yargeau V Gonzalez A, Fussmann GF, 2021. Widespread agrochemicals differentially affect zooplankton biomass and community structure. Ecological Applications in press. doi: 10.1002/EAP.2423

Knauer, Katja, Leimgruber, Andrea, Hommen, Udo, Knauert, Stefanie (2010). "Co-tolerance of phytoplankton communities to photosynthesis II inhibitors". *Aquatic Toxicology. 96 (4): 256–263.* doi:10.1016/j.aquatox.2009.11.001.

Knopper, L. D., Siciliano, S. D. (2002). "A Hypothetical Application of the Pollution-Induced Community Tolerance Concept in Megafaunal Communities Found at Contaminated Sites". *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 8 (5): 1057–1066.* doi:10.1080/1080-700291905819. ISSN 1080-7039.

Lambert, AS., *Dabrin,* A., *Foulquier,* A., *Morin,* S., *Rosy,* C., *Coquery,* M., *Pesce,* S., *2017.* Influence of temperature in pollution-induced community tolerance approaches used to assess effects of copper on freshwater phototrophic periphyton. *Science of The Total Environment. 607–608: 1018–1025.* doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.035.

Lambert, AS., *Pesce,* S., *Foulquier,* A., *Gahou,* J., *Coquery,* M., *Dabrin,* A., *2015.* Improved short-term toxicity test protocol to assess metal tolerance in phototrophic periphyton: toward standardization of PICT approaches. *Environmental Science and Pollution Research. 22 (6): 4037–4045.* doi:10.1007/s11356-014-3505-4. ISSN 0944-1344

Lambert, AS., *Morin,* S., *Artigas,* J., *Volat,* B., *Coquery,* M., *Neyra,* M., *Pesce,* S., *2012.* Structural and functional recovery of microbial biofilms after a decrease in copper exposure: Influence of the presence of pristine communities. *Aquatic Toxicology. 109: 118–126.* doi:10.1016/j.aquatox.2011.12.006.

Larras, F., *Rimet,* F., *Gregorio,* V., *Bérard,* A., *Leboulanger,* C., *Montuelle,* B., *Bouchez,* A., *2016.* Pollution-induced community tolerance (PICT) as a tool for monitoring Lake Geneva long-term in situ ecotoxic restoration from herbicide contamination. *Environmental Science and Pollution Research. 23 (5): 4301–4311.* doi:10.1007/s11356-015-5302-0. ISSN 0944-1344.

Magnusson M, Heimann, K, Ridd, M, Negri, AP, 2012. Chronic herbicide exposures affect the sensitivity and community structure of tropical benthic microalgae. Marine Pollution Bulletin 65, 4-9: 363-372. DOI 10.1016/j.marpolbul.2011.09.029

Mahamoud AA*., Tardy,* V*., Bonnineau,* C*., Billard,* P*., Pesce,* S*., Lyautey,* E., *2020.* Changes in sediment microbial diversity following chronic copper-exposure induce community copper-tolerance without increasing sensitivity to arsenic*. Journal of Hazardous Materials. 391: 122197.* doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122197.

McClellan K., Altenburger R. & Schmitt-Jansen M. (2008) Pollution-induced community tolerance as a measure of species interaction in toxicity assessment. Journal of Applied Ecology, 45, 1514–1522.

Millward, RN*., Grant,* A., *1995.* Assessing the impact of copper on nematode communities from a chronically metal-enriched estuary using pollution-induced community tolerance*. Marine Pollution Bulletin. 30 (11): 701–706.* doi:10.1016/0025-326x(95)00053-p*.* ISSN 0025-326X.

Nyström et al., 2000. Evaluation of the capacity for development of atrazine tolerance in periphyton from a swedish freshwater site as determined by inhibition of photosynthesis and sulfolipid synthesis. Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 19, No. 5, pp. 1324–1331, DOI : 10.1002/etc.5620190515

Oguma, AY*., Klerks,* PL*., 2017.* Pollution-induced community tolerance in benthic macroinvertebrates of a mildly lead-contaminated lake*. Environmental Science and Pollution Research. 24 (23): 19076–19085.* doi:10.1007/s11356-017-9553-9*.* ISSN 0944-1344.

Pesce S, Lissalde S, Lavieille D, Margoum C, Mazzella N, Roubeix V, Montuelle B, 2010. Evaluation of single and joint toxic effects of diuron and its main metabolites on natural phototrophic biofilms using a pollution-induced community tolerance (PICT) approach. Aquatic Toxicology 99 (2010) 492–499

Pesce, S., Margoum C., Foulquier A., *2016.* Pollution-induced community tolerance for in situ assessment of recovery in river microbial communities following the ban of the herbicide diuron*. Agriculture, Ecosystems & Environment. 221: 79–86.* doi:10.1016/j.agee.2016.01.009. ISSN 0167-8809*.*

Pesce, S*., Lambert,* AS*., Morin,* S*., Foulquier,* A*., Coquery,* M*., Dabrin,* A., *2018.* "Experimental Warming Differentially Influences the Vulnerability of Phototrophic and Heterotrophic Periphytic Communities to Copper Toxicity"*. Frontiers in Microbiology. 9: 1424.* doi:10.3389/fmicb.2018.01424*.* ISSN 1664-302X. PMC 6036129*.* PMID 30013533*.*

Pesce, S., Margoum C., *Montuelle,* B., *2010.* In situ relationships between spatio-temporal variations in diuron concentrations and phototrophic biofilm tolerance in a contaminated river*. Water Research. 44 (6): 1941–1949.* doi:10.1016/j.watres.2009.11.053.

Pesce, S*., Morin,* S*., Lissalde,* S*., Montuelle,* B*., Mazzella,* N*., 2011.* Combining polar organic chemical integrative samplers (POCIS) with toxicity testing to evaluate pesticide mixture effects on natural phototrophic biofilms*. Envi. Poll.. 159 (3): 735–741.* doi:10.1016/j.envpol.2010.11.034. ISSN 0269-7491*.*

Rutgers, M., Breure, AM., 1999. Risk Assessment, Microbial Communities, and Pollution-Induced Community Tolerance. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 5 (4): 661–670. doi:10.1080/10807039.1999.9657730. ISSN 1080-7039.

Schmitt-Jansen, M., Altenburger, R., 2005. Predicting and observing responses of algal communities to photosystem II-herbicide exposure using pollution-induced community tolerance and species-sensitivity distributions. Environmental Toxicology and Chemistry. 24 (2): 304–312. doi:10.1897/03-647.1*.* PMID 15719989*.*

Schmitt-Jansen, M., Altenburger, R., 2008. Community-level microalgal toxicity assessment by multiwavelength-excitation PAM fluorometry*. Aquatic Toxicology. 86 (1): 49–58.* doi:10.1016/j.aquatox.2007.10.001. ISSN 0166-445X*.*

Seghers D., et al., 2003. Pollution induced community tolerance (PICT) and analysis of 16S rRNA genes to evaluate the long-term effects of herbicides on methanotrophic communities in soil. European Journal of Soil Science, December 2003, 54, 679–684. doi: 10.1046/j.1365-2389.2003.00560.x

Seguin, F, Le Bihan, F, Leboulanger, C, Bérard, A, 2002. A risk assessment of pollution: induction of atrazine tolerance in phytoplankton communities in freshwater outdoor mesocosms, using chlorophyll fluorescence as an endpoint*. Water Research. 36 (13): 3227–3236.* doi:10.1016/s0043-1354(02)00013-1*.* ISSN 0043-1354*.* PMID 12188119*.*

Tison, J., Park, Y.-S., Coste, M., Wasson, J.G., Ector, L., Rimet, F., Delmas, F., 2005. Typology of diatom communities and the influence of hydro-ecoregions: A study on the French hydrosystem scale. Water Research, 39, 3177-3188, https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.029.

Tlili A, Bérard A, Blanck H, Bouchez A, Cassio F, Eriksson Km, Morin S, Montuelle B, Navarro E, Pascoal C, Pesce S, Schmitt-Jansen M, Behra R, 2015, Pollution-induced community tolerance (PICT): towards an ecologically relevant risk assessment of chemicals in aquatic systems, Freswater Biol. online: 8 APR 2015. doi:10.1111/fwb.12558. http://dx.doi.org/10.1111/fwb.12558

Tlili A., Berard A, Roulier J-L, Volat B., Montuelle B, 2010. PO4 dependence of biofilm autotrophic and heterotrophic communities tolerance to copper and diuron. Aquatic Toxicol. doi:10.1016/j.aquatox.2010.02.008

Tlili A., Marechal M., Montuelle B Volat B., Dorigo U., Bérard A., 2011. Use of the Microresp™ method to assess Pollution-Induced Community Tolerance for lotic biofilms Env. Poll.

Tlili, A*., Corcoll,* N*., Arrhenius,* A*., Backhaus,* T*., Hollender,* J*., Creusot,* N*., Wagner,* B*., Behra,* R*., 2020.* Tolerance Patterns in Stream Biofilms Link Complex Chemical Pollution to Ecological Impacts*. Environmental Science & Technology. 54 (17): 10745–10753.* doi:10.1021/acs.est.0c02975. ISSN 0013-936X*.*

Traoré, H*., Crouzet,* O*., Mamy,* L*., Sireyjol,* C*., Rossard,* V*., Servien,* R*., Latrille,* E*., Martin-Laurent,* F*., Patureau,* D*., Benoit,* P*., 2017.* Clustering pesticides according to their molecular properties, fate, and effects by considering additional ecotoxicological parameters in the TyPol method*. Environmental Science and Pollution Research. 25 (5): 4728–4738.* doi:10.1007/s11356-017-0758-8*.* ISSN 0944-1344*.*

Vázquez-Blanco, R*., Arias-Estévez,* M*., Bååth,* E*., Fernández-Calviño,* D*., 2021.* Comparing the effect of Cu-based fungicides and pure Cu salts on microbial biomass, microbial community structure and bacterial community tolerance to Cu*. Journal of Hazardous Materials. 409: 124960.* doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124960*.*

Wakelin, S, Gerard E., Black A., Hamonts K., Condron L., Yuan T., van Nostrand J., Zhou J., O'Callaghan M., *2014.* Mechanisms of pollution induced community tolerance in a soil microbial community exposed to Cu*. Environmental Pollution. 190: 1–9.* doi:10.1016/j.envpol.2014.03.008*.* ISSN 0269-7491

Zabaloy, MC*., Garland,* JL*., Gomez,* MA*., 2010.* Assessment of the impact of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) on indigenous herbicide-degrading bacteria and microbial community function in an agricultural soil*. Applied Soil Ecology. 46 (2): 240–246.* doi:10.1016/j.apsoil.2010.08.00