

# centre ecotox news

**28. édition mai 2024**

Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée



Étude des filtres UV dans  
le lac de Geschinen p. 3

Nouvelle étape franchie pour  
l'indice Oligochètes génétique  
pour les sédiments p. 4

Comment prendre en compte la  
toxicité des mélanges ? p. 6

Un entretien avec le « père »  
du Centre Ecotox p. 9

# Évaluation des risques et cocktails chimiques



Dr. Marion Junghans, Responsable de l'équipe Évaluation des risques

L'évaluation des risques est décisive pour estimer les effets des produits chimiques sur notre environnement et élaborer des stratégies d'atténuation. Les méthodes sont déjà bien établies pour les substances isolées mais, dans la nature, c'est sous forme de mélanges complexes qu'elles se présentent généralement. Il y a plus de 20 ans, mes recherches de doctorat voulaient déjà contribuer à la prise en compte de la toxicité de ces cocktails dans la réglementation. Près d'un quart de siècle plus tard, ce cap n'est pas encore tout à fait atteint mais nous avons franchi des étapes décisives dans la bonne direction (voir l'article p. 6 pour plus de détails).

Il est unanimement reconnu que la toxicité des substances parvenant simultanément ou successivement dans l'environnement est souvent plus élevée que celle des substances isolées. À travers son règlement REACH, l'Union européenne met ainsi tout en œuvre en vue de prendre en compte la toxicité potentielle des mélanges dans l'homologation des substances individuelles. Dans la directive-cadre sur l'eau, une approche globalisante a déjà été adoptée pour fixer des seuils pour la famille des PFAS (substances per et polyfluoroalkylées). En Suisse, certains cantons appliquent depuis un certain temps une de nos méthodes pour évaluer le risque dû aux mélanges. Je remercie sincèrement les services de la protection

des eaux des cantons de Zurich et de Berne qui, par leur demande, nous ont incités à la développer.

Dans le projet européen PARC, nous travaillons actuellement à une amélioration des méthodes d'évaluation des effets cocktail dans le cadre de l'homologation et à la prise en compte de cette toxicité dans l'évaluation des résidus de produits phytosanitaires dans les sols. Par ailleurs, nous nous employons à comparer les méthodes d'évaluation des risques utilisées pour les phytosanitaires isolés dans différents contextes réglementaires (homologation en tant que produit phytosanitaire, biocide ou médicament vétérinaire, REACH, directive-cadre sur l'eau) afin de voir si une harmonisation serait possible selon le principe « une substance – une évaluation ».

Mais ce n'est pas la seule question qui occupe le Centre Ecotox en matière d'évaluation des risques. Nous avons déjà déterminé pour la Suisse des critères de qualité environnementale pour une centaine de substances et nous mettons aujourd'hui leurs dossiers en ligne sur notre site pour que les données utilisées pour leur calcul soient publiques (p. 11). Nous traitons sans cesse de nouveaux composés: aujourd'hui, c'est par exemple le tour de la 6-PPD-quinone, un résidu de l'abrasion des pneus qui a causé des hécatombes chez les poissons aux États-Unis. Et alors que les méthodes de détermination des seuils sont déjà bien établies pour l'eau et les sédiments, il reste encore beaucoup à faire dans le domaine des sols. Nous travail-

lons ainsi actuellement pour le Plan d'action sur les produits phytosanitaires à la détermination de valeurs de référence écologiques pour ces composés dans les sols. Et nous faisons de même pour le groupe des PFAS dans le cadre de la motion Maret.

Nous assurons d'autre part l'accompagnement d'un monitoring de l'antibiorésistance dans les eaux de surface européennes et la gestion d'une base de données qui rassemble les critères de qualité environnementale disponibles dans le monde. La communication sur les risques nous tient aussi particulièrement à cœur: nous y travaillons de conserve avec le Centre suisse de toxicologie humaine appliquée (SCAHT) et l'Eawag. Nous consacrons aussi beaucoup de temps à conseiller les autorités, les entreprises, les particuliers et les médias et à des prises de position sur les adaptations de la loi. Nous soutenons ainsi les efforts de la Suisse en matière d'évaluation des risques et contribuons à établir de bonnes bases au niveau européen.

Titre: Le Geschinerbach alimente le lac du même nom, dans lequel le Centre Ecotox a recherché des résidus de produits solaires (voir p. 3). Des échantillons prélevés dans le ruisseau ont été utilisés comme contrôle pendant le monitoring (photo: Alexandra Kroll).

# Étude des filtres UV dans le lac de Geschinen

**Le Centre Ecotox a détecté des résidus de crèmes solaires dans un lac du Valais très apprécié pour la baignade. Les concentrations, dont une augmentation a été observée au cours de la fréquentation, atteignaient pour certains composés des valeurs du même ordre que les critères de qualité provisoires. Une étude approfondie de la situation en Suisse est prévue.**

Essentiel à la vie, le soleil n'est pas sans danger, son rayonnement UV pouvant causer coups de soleil et cancers de la peau. Pour nous en protéger, nous utilisons des produits solaires contenant des filtres UV. Or ils entrent en contact avec le milieu aquatique quand nous nous baignons et certains des quelque 30 filtres UV autorisés en Suisse peuvent être dangereux pour les organismes aquatiques. Dans un projet pilote mené au lac valaisan de Geschinen, le Centre Ecotox a donc cherché à savoir si ces composés étaient détectables dans ce paradis des baigneurs. Le camp fédéral scout, qui a rassemblé plus de 30'000 personnes au bord du lac pendant l'été 2022, offrait une formidable occasion d'étudier la question.

## **Les filtres UV peuvent affecter les organismes aquatiques**

Certains filtres UV peuvent avoir des effets néfastes sur la faune et la flore des écosystèmes aquatiques: perturbations de la croissance et de la photosynthèse chez les algues, atteintes aux jeunes moules, blanchissement et mortalité chez les coraux, féminisation des mâles et perturbation des fonctions reproductrices chez les pois-

sons, etc. « Nos connaissances sont encore lacunaires en ce qui concerne la toxicité chronique des filtres solaires, en particulier chez les organismes d'eau douce, relève Alexandra Kroll, la responsable du projet. Mais diverses informations indiquent que certains filtres UV ont une action endocrinienne. »

## **Sept composés détectés dans le lac de baignade**

Le Centre Ecotox a assisté l'équipe Environnement du camp scout en lui indiquant les mesures à prendre pour réduire les risques encourus par le petit lac suite au supplément de fréquentation dû à la rencontre. Ensuite, des échantillons d'eau ont été prélevés avant et pendant l'évènement à différents endroits du lac pour déterminer les concentrations des sept filtres solaires organiques les plus fréquents. Tous ces composés ont été détectés dans le lac de Geschinen et ce, à des teneurs pouvant aller jusqu'à 800 ng/l. Une augmentation des concentrations a été observée au cours de la rencontre suite à sa fréquentation régulière pour la baignade. Cette hausse était particulièrement marquée pour la benzophénone-3 et l'octocrylène. « Les concentrations mesurées étaient du même ordre de grandeur que les critères de qualité provisoires établis pour ces substances, indique Alexandra Kroll. On ne peut donc exclure des effets sur les organismes aquatiques. »

## **Une étude prévue pour évaluer la situation à l'échelle de la Suisse**

Cet été 2024, le Centre Ecotox surveillera plusieurs lacs de baignade suisses tout au long de la saison. « Nous voulons collecter

davantage de données sur la présence et la distribution des filtres UV dans ces milieux aquatiques », explique Alexandra Kroll. D'autre part, des essais de baignade contrôlée sont prévus dans des étangs expérimentaux pour étudier le cheminement des filtres solaires, de la peau jusque dans l'eau, et suivre leur devenir consécutif. D'anciennes analyses ont déjà montré que ces composés pouvaient être transférés dans les sédiments ; cela doit être vérifié. L'étude prévoit également des essais sur l'action des filtres UV sur les organismes du sédiment et sur la contamination passée à partir de carottes sédimentaires. « Nous aimerions ainsi nous faire une idée assez complète de la situation des lacs de baignade suisses en matière de contamination par les filtres UV », confie Alexandra Kroll.

Fiche d'information sur les filtres solaires dans le milieu aquatique :

[www.centreecotox.ch/news-publications/fiches-info](http://www.centreecotox.ch/news-publications/fiches-info)

Vidéo sur le projet mené au lac de Geschinen

[www.centreecotox.ch/projets/ecotoxicologie-aquatique/les-filtres-uv-dans-le-lac-de-geschinen](http://www.centreecotox.ch/projets/ecotoxicologie-aquatique/les-filtres-uv-dans-le-lac-de-geschinen)

Contact : Alexandra Kroll,  
[alexandra.kroll@oekotoxzentrum.ch](mailto:alexandra.kroll@oekotoxzentrum.ch)

## **Différents types de filtres UV**

Pour protéger la peau des rayons UV, les produits solaires contiennent des filtres constitués de substances organiques (agissant par voie chimique) ou minérales (agissant comme des barrières physiques). Chaque filtre protège dans un certain domaine de longueurs d'onde. Ces substances sont donc combinées pour obtenir une protection étendue. Les filtres solaires organiques sont des substances qui absorbent les rayons UV et les transforment en chaleur. Aujourd'hui, 28 filtres organiques sont autorisés en Suisse. Les filtres solaires minéraux sont constitués de petites particules qui absorbent et réfléchissent les rayons UV et protègent ainsi la peau du rayonnement solaire. Les deux filtres minéraux aujourd'hui autorisés sont le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) et l'oxyde de zinc (ZnO).



Le Geschinersee dans la vallée de Conches est un lac de baignade très apprécié.

# Nouvelle étape franchie pour l'indice Oligochètes génétique pour les sédiments

**Les communautés d'oligochètes apportent des informations sur la qualité biologique des sédiments mais tous les spécimens ne peuvent pas être déterminés à l'espèce au microscope. Des biologistes du Centre Ecotox ont développé une méthode génétique de détermination des espèces qui vient maintenant d'être intégrée en tant que rapport d'expert dans le système modulaire gradué.**

Les sédiments sont un élément fondamental des lacs et cours d'eau. Ils constituent un milieu de vie particulier et essentiel qui filtre l'eau de surface quand elle rejoint les eaux souterraines. Ils retiennent en même temps de nombreux polluants comme les métaux lourds, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB) et les pesticides organochlorés qui peuvent toutefois être relargués dans l'eau de surface. La qualité des sédiments influe ainsi sur la qualité de l'écosystème aquatique dans son ensemble.

## **Une communauté dont la composition varie en fonction de la pollution**

Les oligochètes sont des vers annélides qui forment l'un des groupes les plus courants du sédiment. Attendu qu'ils se déplacent peu et se nourrissent essentiellement de sédiments fins, ils se prêtent particulièrement bien à l'évaluation *in situ* de la qualité des sédiments. Ils se répartissent en une multitude d'espèces présentant des degrés très divers de sensibilité à la pollution. La composition de la communauté varie donc en fonction du degré de contamination du milieu. L'Indice Oligochètes de Bioindication des Sédiments (IOBS), basé sur la composition de la communauté d'oligochètes des sédiments fins/sableux des cours d'eau, donne une indication de la pollution de type toxique et vient ainsi compléter l'information écologique fournie par les autres bioindicateurs, comme l'IBCH pour les macroinvertébrés et le DI-CH pour les diatomées. Cet indice a déjà été appliqué en routine par le Service de l'écologie de l'eau du canton de Genève et de manière ponctuelle par d'autres cantons (Vaud et Valais).

## **Une détermination facilitée par les codes-barres génétiques**

L'identification des espèces d'oligochètes au microscope est cependant très difficile. « De plus, les jeunes individus et certaines espèces ne peuvent pas être déterminés à partir de leurs caractères morphologiques », souligne Régis Vivien, le responsable du projet. Mais il existe une solution : l'utilisation de courtes séquences d'ADN ou codes-barres génétiques. Certaines régions de l'ADN changent en effet de façon spécifique d'une espèce à l'autre. La comparaison des séquences des spécimens collectés avec les séquences d'une base de données de référence permet alors des identifications à l'espèce.

L'utilisation des codes-barres génétiques peut ainsi faciliter la détermination des oligochètes et donc le diagnostic écologique. « Le recours à la biologie moléculaire peut sembler laborieux, remarque Régis Vivien. Mais grâce au séquençage à haut débit, nous pouvons séquencer de nombreux échantillons simultanément. » L'ADN ainsi séquencé peut être extrait d'individus isolés, de mélanges d'oligochètes ou encore du sédiment. Le Centre Ecotox a développé

une méthode d'évaluation de la qualité des sédiments basée sur le séquençage de spécimens marqués génétiquement. L'abondance de chaque espèce présente est déterminée et la valeur de l'IOBS calculée.

## **Validation réussie de la méthode génétique**

Les biologistes ont maintenant validé cette approche sur la base d'échantillons collectés dans 25 cours d'eau répartis dans divers cantons suisses. Ils ont pour cela prélevé 48 individus dans chaque échantillon de sédiment, ont extrait leur ADN, puis les ont marqué génétiquement et séquencé (séquençage à haut débit). La quasi-totalité des individus a pu être identifiée à l'espèce grâce à la base de données de référence établie par le Centre Ecotox pour les oligochètes de Suisse (cf. encart) et à des données complémentaires. « Nous avons tout d'abord identifié les individus de chaque site par la méthode génétique puis nous avons calculé l'IOBS, explique Régis Vivien. Nous avons ensuite comparé cette valeur avec celle obtenue à partir de la détermination de 100 individus au microscope. Les résultats concordaient parfaitement, ce qui montre que notre méthode convient pour l'évaluation de la qualité biologique des sédiments dans les cours d'eau. »

Les scientifiques ont d'autre part pu enrichir leur base de données de référence de 78 espèces d'oligochètes, portant à 184 de nombre d'espèces enregistrées. La nouvelle méthode peut d'ores et déjà être utilisée pour l'évaluation de la qualité des sédiments mais les coûts sont encore beaucoup plus élevés que pour la détermination au microscope. Le Centre Ecotox travaille à une optimisation en vue de réduire les coûts d'analyse, notamment par l'utilisation d'une autre méthode d'extraction de l'ADN.

## **Méthodes de metabarcoding**

Les biologistes ont également testé deux méthodes génétiques plus simples, dans lesquelles les oligochètes ne sont pas identifiés individuellement mais analysés en mélange : on parle alors de metabarcoding ADN(e). Cette approche a été appliquée, d'une part, à l'ADN extrait de mélanges d'oligochètes (un mélange par site), et d'autre part, à l'ADN directement extrait de l'éthanol préservant les sédiments tamisés (ADN environnemental).

Là encore, il a été possible d'identifier les espèces correspondant aux fragments d'ADN trouvés grâce à la base de données de référence et à des données complémentaires et donc d'analyser les communautés d'oligochètes. Les résultats obtenus présentent une bonne concordance avec ceux de l'observation des vers au microscope. Toutefois, les pourcentages d'individus appartenant à deux (sous-)familles importantes étaient fortement sous-estimés, si bien que les méthodes ne sont pas encore assez précises pour une analyse écologique correcte. Le problème pourrait être lié à la méthode utilisée pour l'extraction de l'ADN. « Nous voulons tester d'autres méthodes d'extraction de l'ADN, révèle Régis Vivien. Si cela ne permet pas d'amélioration significative, nous envisageons de mettre au point et d'utiliser des amorces spécifiques des oligochètes. » Par ailleurs, l'utilisation de facteurs de correction des nombres de séquences des espèces dont l'abondance est systématiquement sur ou sous-estimées est également concevable. « Le développement de ces méthodes en vaut vraiment la peine,

car elles sont relativement peu coûteuses et pourraient permettre un screening à haut débit de la qualité biologique des sédiments », estime Régis Vivien.

### Les méthodes Oligochètes en voie d'utilisation pratique de routine

La méthode ici validée vient tout juste d'être intégrée en tant que rapport d'expert au catalogue de méthodes du système modulaire gradué d'appréciation de la qualité des cours d'eau suisses ([www.modul-stufen-konzept/fr](http://www.modul-stufen-konzept/fr)). Elle pourrait également faciliter l'application d'autres indices biologiques, comme ceux basés sur les communautés de chironomes et d'oligochètes des sédiments lacustres, ou sur les oligochètes de la matrice poreuse (sédiments grossiers de surface et milieu hyporhéique) des cours d'eau, où l'identification morphologique des espèces est particulièrement difficile. La méthode oligochètes des Traits fonctionnels (TRF), basée sur l'étude de la matrice poreuse permet non seulement d'évaluer le degré de pollution chimique mais aussi de connaître la dynamique des échanges hydrologiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Cette méthode a déjà permis de montrer sur plusieurs sites les effets des rejets de stations d'épuration sur la qualité et le fonctionnement du milieu récepteur. Les oligochètes sont donc des organismes très prometteurs pour l'évaluation de la qualité de milieux très variés et les méthodes seront probablement bientôt suffisamment optimisées pour permettre une utilisation de routine à grande échelle.

### Une base de données de référence pour la Suisse

Toutes les régions de l'ADN ne se prêtent pas à l'identification des espèces. Pour les espèces animales, on utilise le plus souvent comme « code-barres génétique » un segment d'environ 650 paires de bases du gène mitochondrial codant la cytochrome c oxydase (COI). L'ADN mitochondrial présente un taux élevé de mutations, si bien que des différences significatives apparaissent très rapidement – « seulement » des milliers de générations – entre les populations et en leur sein. Le Centre Ecotox a établi une base de données de référence des séquences COI pour les oligochètes aquatiques de Suisse et déterminé des seuils de divergence génétique à partir desquels une distinction entre les espèces peut s'effectuer.

Pour en savoir plus: Vivien, R., Cermakova, K., Pawlowski, J., Ferrari, B.J.D. (2023) OligoGen: Développement de méthodes oligochètes génétiques pour évaluer la qualité biologique des sédiments de cours d'eau. [www.centreecotox.ch/news-publications/rapports](http://www.centreecotox.ch/news-publications/rapports)

Contact: Régis Vivien,  
[regis.vivien@centreecotox.ch](mailto:regis.vivien@centreecotox.ch)

De nombreuses espèces d'oligochètes vivent dans les sédiments et sont plus ou moins sensibles à la pollution. Il est possible de les identifier non seulement au microscope, mais aussi génétiquement.



# Comment prendre en compte la toxicité des mélanges ? De nouvelles approches pour l'homologation et le monitoring

**Les cocktails de produits chimiques présents dans l'environnement posent un véritable défi aux autorités, à la recherche et à l'industrie car le risque qu'ils représentent est très difficile à évaluer. Le Centre Ecotox aide à développer des concepts applicables dans la pratique.**

Assainissement, agriculture, industrie – les sources de pollution sont multiples. Les produits chimiques d'origine diverse se mélangent dans le milieu naturel où ils peuvent nuire aux organismes vivants et donc au bon fonctionnement des écosystèmes. Jusqu'à présent, l'évaluation des effets des polluants chimiques et leur réglementation s'effectuent presque exclusivement au niveau individuel – et ce, aussi bien dans le cadre de l'évaluation prospective des risques en vue de l'homologation que dans l'évaluation rétrospective du risque pour la mise en œuvre de la réglementation ou la surveillance environnementale. Or cela ne suffit pas car la toxicité des mélanges peut être plus forte que celle des substances individuelles. Un mélange peut ainsi avoir des effets toxiques même lorsque toutes les substances qui le composent sont présentes à des concentrations où elles ne sont pas toxiques individuellement. C'est particulièrement vrai pour les composés ayant un mode d'action similaire comme les substances œstrogéniques. Des efforts sont donc entrepris internationalement pour améliorer l'évaluation des effets cocktail et le Centre Ecotox y participe.

## **Additivité des doses ou additivité des réponses ?**

Deux grands concepts président à la prédiction des effets cocktail : dans le cas de **l'additivité des doses**, on considère que les substances ayant un mode d'action similaire se comportent en mélange comme des dilutions d'une seule et même substance – un peu comme des boissons alcoolisées présentant différents degrés d'alcool. Pour déterminer la toxicité du mélange, on peut alors faire la somme de leurs unités toxiques. Dans le cas de **l'additivité des réponses**, on considère que les substances ont des modes d'action différents et ne présentent pas d'interactions ; c'est alors sur la somme des réponses que l'on se base. L'évaluation sur la base de l'additivité des doses prédit souvent une toxicité

plus élevée et nécessite moins de données que l'approche d'additivité des réponses. En vertu du principe de précaution, le concept d'additivité des doses est donc privilégié car plus protecteur. « En fait, il n'y a pas une si grande différence entre ces deux modèles dans la pratique », révèle Marion Junghans, qui dirige le groupe Évaluation des risques au Centre Ecotox et travaille depuis plus de 20 ans sur la prévision de la toxicité des mélanges. « Bien souvent, la toxicité d'un mélange est principalement due à un nombre restreint de substances tandis que le gros des substances présentes n'y contribue qu'assez peu. »

## **Les critères de qualité environnementale donnent la mesure de la qualité de l'eau**

Le Centre Ecotox a déjà élaboré une stratégie pour la prise en compte des mélanges de substances dans l'évaluation de la qualité de l'eau [1]. Cette approche est basée sur les critères de qualité déjà employés pour l'évaluation des substances individuelles et ne nécessite pas de données supplémentaires, ce qui la rend très facile à appliquer.

Pour évaluer la qualité de l'eau, on commence en général par doser les substances détectables par analyse chimique. On compare ensuite les différentes concentrations mesurées dans l'environnement (MEC pour *measured environmental concentration*) aux données d'écotoxicité des substances correspondantes. On détermine pour cela des critères de qualité environnementale (CQE) pour les différentes substances à partir des effets écotoxicologiques mesurés avec différents groupes d'organismes. Les CQE sont les concentrations au-dessus desquelles des effets nocifs sur la santé, la reproduction et le développement des organismes sensibles ne peuvent être exclus. Le Centre Ecotox a déterminé des CQE pour plus de 100 substances et les met à libre disposition sur son site [2]. Certains d'entre eux, correspondant à des produits phytosanitaires et des médicaments, ont déjà été intégrés aux exigences chiffrées de l'ordonnance sur la protection des eaux et sont donc contraignants en regard de la loi.

## **Calcul du risque lié au mélange à partir des substances détectées par analyse**

Le rapport entre la MEC et le CQE est appelé le quotient de risque (QR). Si la MEC

dépasse le CQE, le quotient de risque est supérieur à 1, ce qui indique qu'un risque existe et que des effets nocifs sur les organismes aquatiques ne peuvent être exclus. Il existe deux types de critères de qualité environnementale : les critères de qualité aiguë, conçus pour protéger des effets à court terme, et les critères de qualité chronique protégeant des effets à plus long terme. On distingue ainsi de la même façon les quotients de risque aigu et de risque chronique. Pour calculer le risque dû à un mélange de substances, on fait la somme des QR des  $n$  substances quantifiées en son sein.

$$QR_{mix} = \sum_i^n QR_i = \sum_i^n \frac{MEC_i}{CQE_i}$$

Étant donné, toutefois, que les substances sont souvent toxiques pour un certain groupe d'organismes (plantes aquatiques, invertébrés ou poissons), on ne prend en compte que les QR des substances auxquelles le groupe est particulièrement sensible. On parle aussi dans ce cas de groupes d'évaluation. Le risque dû au mélange est ainsi calculé séparément pour les plantes aquatiques, les invertébrés et les poissons. Le risque total dans le milieu est alors celui du groupe le plus fortement menacé – présentant donc le QR le plus élevé – qui est par conséquent déterminant pour le risque.

Les produits phytosanitaires sont un bon exemple pour cette approche. Alors que les herbicides présentent surtout un risque pour les plantes aquatiques et que les insecticides menacent principalement les invertébrés, les fongicides peuvent affecter les trois groupes d'organismes. Le modèle a déjà été appliqué avec succès aux données des dernières campagnes de surveillance des produits phytosanitaires en Suisse de NAWA SPEZ ([3], p.ex.). « Nous avons comparé cette méthode avec une méthode plus compliquée, qui se basait sur les modes d'action des substances individuelles et demandait beaucoup plus de données, et nous avons obtenu des résultats similaires, indique Marion Junghans. C'est donc, à notre avis, une approche bien adaptée à la pratique qui donne de bons résultats. »

## **Évaluation du risque des mélanges dans le cadre de l'homologation**

Mais la toxicité des mélanges de substances ne devrait pas être prise en compte



Dans l'environnement, de nombreux polluants agissent ensemble sur les organismes de l'écosystème. La toxicité de ces mélanges devrait être prise en compte lors de l'autorisation et de la surveillance de l'environnement.

qu'une fois qu'ils se retrouvent dans l'environnement mais dès la procédure d'homologation des produits chimiques. Une telle démarche permettrait d'éviter, à la source, que des cocktails toxiques se forment. Pour tenir compte du risque des mélanges pour les organismes aquatiques, les experts œuvrant dans les administrations publiques et les organes de recherche ont proposé d'appliquer un facteur pragmatique d'évaluation du mélange appelé MAF (pour *mixture assessment factor*) censé couvrir l'ensemble des co-expositions.

Dans l'approche MAF, les valeurs limites définies individuellement pour les substances sont corrigées à l'aide d'un facteur prenant en compte les effets cocktail afin que seules soient autorisées les concentrations qui, combinées à celles des autres substances supposées, ne présentent pas

de risque pour les organismes aquatiques. Pour chaque composé, la concentration autorisée est ainsi réduite d'un facteur correspondant au MAF.

#### Détermination du facteur d'évaluation du mélange MAF

Thomas Backhaus a développé une approche reconnue de calcul du MAF pour l'Agence suédoise des produits chimiques [4]. L'objectif du MAF est de garantir que le quotient de risque du mélange de substances  $QR_{mix}$ , calculé en faisant la somme des quotients de risque individuels, ne dépasse pas la valeur 1.

$$QR_{mix} = \sum QR_1 + QR_2 + QR_3 \dots \leq 1$$

avec pour chaque QR :  $QR_i \leq \frac{1}{MAF}$

Le MAF est ainsi un facteur qui réduit le  $QR_i$  autorisé pour chaque substance à une valeur inférieure ou égale à  $1/MAF$  afin que le quotient de risque total  $QR_{mix}$  reste inférieur ou égal à 1. Les quotients de risque des substances les moins toxiques, déjà inférieurs à  $1/MAF$ , restent inchangés. Les quotients de risque – et donc les concentrations autorisées – des autres substances sont réduits d'un facteur MAF calculé pour cela de la façon suivante :

$$MAF_{KEMI} = \frac{n}{\left(1 - \sum QR_i < \frac{1}{MAF}\right)}$$

où n est le nombre de substances présentes dont l'évaluation individuelle a indiqué un quotient de risque supérieur à  $1/MAF$ ; les  $QR_i$  sont les QR des substances dont l'évaluation individuelle a révélé un quotient de risque inférieur à  $1/MAF$ , c'est-à-dire dont

les concentrations dans l'environnement n'ont pas à être réduites d'un facteur supplémentaire.

L'équation montre que le  $MAF_{KEMI}$  dépend directement du nombre  $n$  de substances dont la concentration dépasse la valeur limite corrigée et est influencé par la somme des QR des substances dont les concentrations sont inférieures à la valeur corrigée. Si un mélange concerne plusieurs groupes d'évaluation, le MAF est calculé pour chaque groupe et la valeur la plus élevée est prise en compte. Cette valeur est déterminée par approximation à l'aide d'un algorithme. Le Centre Ecotox a co-développé un système de calcul simplifié qui permet de s'en passer [5]. Le  $MAF_{KEMI}$  augmente avec le nombre de substances présentes dans le mélange car il est basé sur un scénario du pire quant à la distribution des quotients de risque des substances contribuant fortement à la toxicité du mélange : il suppose que chacune de ces substances apporte la même contribution.

### Certaines substances sont particulièrement toxiques

Or il se trouve que, bien souvent, la majeure partie de la toxicité du mélange est due à certaines substances particulières. Pour en tenir compte, le Centre Ecotox a affiné l'approche du  $MAF_{KEMI}$  en lui adjoignant un facteur supplémentaire, le MCR (pour *maximum cumulative ratio*). Le MCR se définit comme le rapport entre le risque total du mélange ( $QR_{sum}$ ) et le risque lié à la substance la plus toxique (caractérisée par  $QR_{max}$ ). On a donc :

$$MAF_{KEMI\ MCR} = \frac{MCR}{1 - \sum QR_i < \frac{1}{MAF}}$$

avec

$$MCR = \frac{QR_{sum}}{QR_{max}}$$

Le calcul du  $MAF_{KEMI\ MCR}$  donne en général des valeurs plus faibles que celui du  $MAF_{KEMI}$  car il tient compte du fait que certaines substances sont responsables de la majeure partie du risque. Ce facteur n'est plus que légèrement dépendant du nombre de substances dans le mélange. Le  $MAF_{KEMI\ MCR}$  est donc protecteur sans aller au-delà du strict nécessaire tout en indi-

quant les substances pouvant être problématiques en mélange.

L'approche MAF a l'avantage d'intégrer la protection contre les effets cocktail dans la gestion du risque au niveau des substances individuelles. Elle dispense ainsi de procéder séparément à une évaluation cumulative du risque. Cette approche a cependant aussi un inconvénient : alors que le risque combiné pour les organismes aquatiques peut varier d'une population locale à l'autre, une seule et même valeur du MAF s'applique à toutes les populations. Ainsi, la réglementation imposée pour chaque valeur du MAF est trop stricte pour certains milieux aquatiques et trop souple pour d'autres. Cela dépend du percentile que l'on choisit dans la distribution du MAF. L'effet protecteur pour l'environnement est d'autant plus fort que ce percentile est élevé.

### Perspectives d'avenir

Le Centre Ecotox travaille actuellement à une comparaison de différents modèles mathématiques pour le calcul du MAF et à leur validation à partir d'importants jeux de données issus de programmes de surveillance en Suisse (NAWA SPEZ) et à l'étranger (NAIADE en France, par exemple). Il élargit également le champ des groupes d'organismes utilisés dans l'évaluation rétrospective de la toxicité des mélanges.

Jusqu'à présent, l'approche développée par le Centre Ecotox pour prendre en compte les effets cocktail dans l'évaluation des milieux aquatiques s'applique aux impacts directs sur les algues, les invertébrés et les poissons et aux empoisonnements secondaires. Elle doit maintenant être étendue à la toxicité pour les organismes du sédiment, pour la santé humaine à travers la consommation de l'eau potable et pour la santé humaine à travers la consommation de produits de la pêche. « Nous aimerions ainsi contribuer à une meilleure prise en compte des effets cocktail à tous les niveaux », explique Marion Junghans.

Contact: Marion Junghans,  
marion.junghans@oekotoxzentrum.ch;  
Fabian Balk,  
fabian.balk@oekotoxzentrum.ch

### Références

- [1] Junghans, M., Kunz, P., & Werner, I. (2013). Toxizität von Mischungen. Aktuelle, praxisorientierte Ansätze für die Beurteilung von Gewässerproben. Aqua & Gas, 93(5), 54-61
- [2] [www.centrecotox.ch/prestations-d-expert/criteres-de-qualite-environnementale/propositions-de-criteres-de-qualite](http://www.centrecotox.ch/prestations-d-expert/criteres-de-qualite-environnementale/propositions-de-criteres-de-qualite)
- [3] Langer, M., Junghans, M., Spycher, S., Koster, M., Baumgartner, C., Vermeissen, E. & Werner, I. (2017): Risque écotoxicologique élevé dans les ruisseaux suisses. Campagne NAWA SPEZ: étude de petits cours d'eau influencés par l'agriculture intensive. Aqua & Gas, 97(12), p. 54-64.
- [4] KEMI (2015) An additional assessment factor (MAF) – a suitable approach for improving the regulatory risk assessment of chemical mixtures? Swedish Chemicals Agency, Stockholm, Article 361159, Report 5/15
- [5] Price, P. S., & Junghans, M. (2023). Assessing the KEMI approach for determining the size of mixture assessment factors needed to protect aquatic receptors from chemical mixtures in surface waters. Current Opinion in Toxicology, 36, 100426 (6 pp.)

# Un entretien avec le « père » du Centre Ecotox

**Rik Eggen, ancien directeur adjoint de l'Eawag, a joué un rôle capital dans la création du Centre Ecotox en 2008 et l'a accompagné de près dans son développement jusqu'à son départ à la retraite fin 2023. Il a ainsi tout d'abord été membre de la direction avant de représenter l'Eawag au Conseil des instituts d'accueil. Il revient avec nous sur ses années avec le Centre Ecotox.**

**Rik, tu as été fortement impliqué dans la création du Centre Ecotox. Quelle était alors la situation et pourquoi avait-on besoin d'une telle structure ?**

À l'époque, on manquait d'expertise en matière de toxicologie appliquée, aussi bien dans le domaine humain qu'environnemental. Cette lacune a été reconnue par les politiques et rendue publique par la Motion Graf qui demandait de montrer comment l'indépendance de l'enseignement, de la recherche et de l'information pouvait être garantie dans les différents domaines de la toxicologie. Cette demande a été soutenue par une éminente part des politiques, des scientifiques et des pouvoirs publics.

Il était unanimement reconnu que le futur centre d'écotoxicologie devait bénéficier d'un bon hébergement scientifique. L'Eawag disposait déjà d'une certaine expertise dans ce domaine et s'est montrée disposée à offrir l'accueil nécessaire. Nous travaillions alors activement au développement d'une écotoxicologie moléculaire et mécanistique qui permettrait d'appréhender les processus toxicologiques dans les écosystèmes complexes. Les jalons étaient également déjà posés pour le transfert vers la pratique. L'EPFL n'a pas tardé à se joindre à l'aventure, disposant elle aussi d'une expertise écotoxicologique, en particulier dans le domaine des sols.

**Quelles étaient, alors, les plus grandes difficultés auxquelles vous étiez confrontés ?**

Les difficultés et les questions étaient les mêmes qu'aujourd'hui. Que devait réaliser le Centre Ecotox et comment le financer ? Les besoins en matière d'écotoxicologie étaient et sont encore très étendus mais les financements ne suffisaient pas pour tout. Il a donc fallu fixer des priorités. Depuis, on



Photo : Peter Penicka, Eawag

essaie toujours, avec les acteurs de terrain, d'optimiser les prestations en fonction du cadre financier disponible. Mais il apparaît aussi de plus en plus nettement que le financement de base existant ne permet pas de couvrir toutes les questions d'écotoxicologie de manière satisfaisante. Une autre difficulté consiste à s'assurer que les compétences acquises se maintiennent et restent disponibles à long terme pour la pratique.

**Tu as longtemps accompagné le Centre Ecotox. Quelles ont été, à ton sens, les avancées les plus marquantes au cours de cette période ?**

La liste est longue ! Dès la création du Centre, une collaboration fructueuse s'est développée avec l'Eawag et l'EPFL mais aussi avec la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, tant sur le plan scientifique que matériel. Le Centre Ecotox a conforté son rôle de centre de prestations et de conseil, pour lequel il a été mandaté, par des échanges soutenus et constructifs avec la pratique et réalisé de nombreux projets à fort impact avec des partenaires extérieurs. Il a ainsi notamment optimisé l'utilisation des bioessais pour l'évaluation de la qualité des eaux tant dans le milieu naturel que dans l'assainissement et déterminé des critères de qualité écotoxicologiques pour de nombreuses substances, dont certains ont déjà été intégrés à l'ordonnance sur la protection des eaux.

Le Centre Ecotox propose d'excellents cours de formation continue pour les spé-

cialistes et il a été salué dans plusieurs évaluations effectuées dans un cadre international comme étant un centre de compétences suisse particulièrement visionnaire. Grâce à l'intégration du budget de base dans celui de l'Eawag et à des financements à plus long terme, des emplois fixes ont pu être créés. Vous disposez aujourd'hui d'une équipe extrêmement compétente sans laquelle le Centre Ecotox ne pourrait pas honorer son mandat de soutien et de conseil pour la Suisse. La collaboration avec le centre de toxicologie humaine SCAHT et de nombreux autres partenaires en Suisse comme à l'étranger compte aussi beaucoup.

**À ton avis, qu'est-ce qui serait particulièrement important pour l'avenir ? Qu'est-ce que tu souhaites au Centre Ecotox ?**

J'espère que l'on parviendra à augmenter le financement de base du Centre Ecotox. C'est primordial pour pouvoir créer de nouveaux postes dans des domaines importants pour la pratique afin de cesser de perdre régulièrement l'expertise acquise. Ensuite, c'est capital pour pouvoir développer des méthodes d'avenir qui pourront être transmises aux spécialistes de terrain. Je souhaite aussi au Centre Ecotox qu'il continue d'incarner et de faire vivre le principe fondateur d'une écotoxicologie appliquée fondée sur des bases scientifiques solides au service de la pratique et de la société. C'était essentiel lors de la création du Centre, ça l'est toujours aujourd'hui et ça le sera encore demain.

# Les brèves du Centre Ecotox



## Fiche info sur les filtres solaires dans le milieu aquatique

Les crèmes solaires prémunissent du cancer de la peau mais se diffusent aussi en partie dans le milieu aquatique lors de la baignade. Or les filtres UV qu'elles contiennent peuvent avoir un impact sur la faune et la flore. Une nouvelle fiche informe sur les différents types de filtres solaires et sur leurs effets dans les écosystèmes aquatiques et propose des pistes pour une protection plus responsable contre les effets du soleil. Le Centre Ecotox a déjà suivi le comportement de certains filtres UV dans un lac de baignade dans un projet pilote et prévoit maintenant d'autres études pour évaluer le devenir des filtres solaires dans les eaux de baignade à l'échelle de la Suisse (voir l'article p. 3).

[www.centreecotox.ch/news-publications/fiches-info](http://www.centreecotox.ch/news-publications/fiches-info), Vidéo sur le projet pilote au lac de Geschinen: [www.oekotoxzentrum.ch/media/195670/sonnencreme\\_oekotox\\_akt22.mp4](http://www.oekotoxzentrum.ch/media/195670/sonnencreme_oekotox_akt22.mp4)

## Des seuils pour les anticoagulants dans le foie des rapaces

Les rodenticides anticoagulants sont utilisés pour lutter contre les rats et les souris mais peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Dans un récent projet de screening, le Centre Ecotox a découvert qu'en Suisse, les renards, les rapaces, les poissons et les hérissons présentaient dans leur foie des concentrations d'anticoagulants comparables aux valeurs mesurées dans les pays voisins.

Un projet de plus grande envergure a maintenant été lancé pour étudier davantage de rapaces sur un territoire plus étendu. Les échantillons de foie sont à nouveau analysés par LC-MS/MS et les dépouilles sont examinées pour détecter d'éventuelles modifications pouvant être mises en relation avec ces rodenticides (hématomes internes, par exemple). Cette démarche doit permettre de déterminer à partir de quelle concentration les rodenticides anticoagulants peuvent avoir un impact sur les rapaces. De tels seuils sont nécessaires pour estimer si des mesures doivent être prises pour mieux protéger ces oiseaux.

Contact: Sibylle Maletz, [sibylle.maletz@oekotoxzentrum.ch](mailto:sibylle.maletz@oekotoxzentrum.ch)



## De nouveaux visages au Centre Ecotox

Luca Gelshorn, Breanne Holmes, Océane Lafargue et Louveline Lépeule renforcent depuis peu les rangs du Centre Ecotox.

**Luca Gelshorn** est collaborateur scientifique au sein du groupe Évaluation des risques où il élabore des propositions de valeurs-guides pour divers PFAS dans les sols. Luca est originaire du Tessin et a fait des études de géosciences et de géographie physique à Lausanne avant d'y effectuer un master en sciences de l'environnement. Dans un stage effectué à l'OFEV, il s'est intéressé aux géodonnées cantonales sur les réserves d'eau souterraine.

**Breanne Holmes** est collaboratrice scientifique au sein du groupe Évaluation des risques où elle travaille à la détermination de critères de qualité environnementale pour les polluants de l'eau. Breanne a fait des études de chimie aux États-Unis et effectué une thèse à l'University of North Carolina dans laquelle elle a étudié l'activité estrogénique et androgénique des sous-produits de désinfection à l'aide de tests de liaison aux récepteurs. Elle a poursuivi à l'université d'Örebro, en Suède, où elle a mis en œuvre des tests au niveau cellulaire et moléculaire pour caractériser le risque lié aux polluants. Elle a ensuite travaillé chez Bayer et Nestlé en tant qu'écotoxicologue.

**Océane Lafargue** a effectué un stage au Centre Ecotox en 2023 et y est restée en tant qu'assistante de recherche en écotoxicologie des sédiments. Océane a fait ses études à l'université de Reims Champagne-Ardenne où elle a effectué un bachelor en sciences de l'environnement puis un master du parcours Biodiversité, Santé et Environnement.

**Louveline Lépeule** est assistante de recherche au sein du groupe Écotoxicologie des sols du Centre Ecotox. Louveline a fait des études de biologie, d'écotoxicologie et de chimie de l'environnement à Montpellier et à Bordeaux. Elle a ensuite travaillé dans la société de certification SGS à Rouen.



### Dossiers sur les critères de qualité disponibles sur notre site

Le Centre Ecotox a déterminé des critères de qualité environnementale pour plus de 100 substances. Ces concentrations spécifiques de chaque composé indiquent la valeur en dessous de laquelle aucun effet n'est supposé se manifester chez les organismes exposés. Nous mettons maintenant à la disposition de tous, sur notre site, les dossiers contenant les données qui ont permis de les calculer afin que chacun puisse comprendre la démarche employée.

Pour déterminer ces valeurs, les toxicologues ont tout d'abord recherché les données de toxicité chronique et aiguë disponibles pour différents organismes aussi bien dans les dossiers d'homologation que dans la littérature scientifique. La pertinence et la fiabilité des données ont alors été vérifiées car ne sont retenues que celles qui répondent à des exigences très strictes. Suivant la quantité des données alors disponibles et suivant leur combinaison, différentes méthodes ont ensuite été employées pour calculer les critères de qualité.

En 2020, les critères de qualité proposés par le Centre Ecotox pour 19 pesticides et 3 médicaments ont été intégrés dans les exigences numériques de l'Ordonnance sur la protection des eaux et sont donc maintenant contraignants en regard de la loi. L'Union européenne a adopté des seuils écotoxicologiques dans sa directive-cadre sur l'eau dès 2008. Ces normes de qualité environnementale (NQE ou EQS pour environmental quality standards) s'appliquent aujourd'hui à 45 substances individuelles ou groupes de substances. De nouvelles substances ou familles de substances doivent maintenant être intégrées dans la liste de l'UE, ce qui portera leur nombre à 65. Le Centre Ecotox a contribué à la détermination de ces seuils supplémentaires. Ils ont déjà été adoptés par le Parlement européen mais doivent encore être confirmés par les États membres.

[www.centreecotox.ch/prestations-d-expert/criteres-de-qualite-environnementale/propositions-de-criteres-de-qualite](http://www.centreecotox.ch/prestations-d-expert/criteres-de-qualite-environnementale/propositions-de-criteres-de-qualite)



### Cours de formation continue au Centre Ecotox

En raison du vif intérêt porté à ce sujet, le cours sur **les PFAS dans l'environnement** sera répété le **25 juin 2024**. Le cours donne un aperçu des sources, de la présence et des effets des PFAS sur l'environnement et l'homme. En outre, il aborde la difficile réglementation et les valeurs limites dans l'environnement, l'eau potable et les denrées alimentaires. L'accent est également mis sur la communication des risques liés aux PFAS, qui pose de grands défis aux autorités, aux chercheurs et aux médias en raison de la complexité de ce groupe de substances. Les présentations ont été enregistrées lors du premier cours et seront maintenant présentées sous forme de vidéos.

Les **6 et 7 novembre 2024**, le Centre Ecotox proposera un cours sur les techniques de biosurveillance connectée de la qualité de l'eau intitulé **Going Dynamic – The potential of online water quality monitoring tools** (cours hybride en anglais). Ce cours proposera un tour d'horizon des applications et des potentialités de différentes méthodes connectées et abordera les aspects liés à la biosurveillance, à la surveillance chimique, à la cytométrie en flux et aux capteurs. Dans ces méthodes, les données sur la réaction de organismes, la qualité chimique, la composition de la communauté bactérienne et les paramètres abiotiques sont relevées en temps réel. Étant donné que les méthodes connectées évaluent la qualité de l'eau quasiment en continu, elles permettent de détecter les pics de pollution. Elles donnent ainsi la possibilité de réagir rapidement aux incidents et constituent donc un instrument de valeur pour la future surveillance de la qualité de l'eau.

[www.centreecotox.ch/prestations-d-expert/formation-continue](http://www.centreecotox.ch/prestations-d-expert/formation-continue)

# L'écotoxicologie dans le monde

**Dans cette rubrique, le Centre Ecotox souhaite vous informer des actualités internationales touchant à la recherche ou à la législation en matière d'écotoxicologie. La sélection proposée ne se prétend pas exhaustive et le contenu des communiqués ne reflète pas nécessairement les positions du Centre Ecotox.**

## **Un herbicide entrave l'adaptation des coraux au changement climatique**

Le changement climatique a entraîné une destruction des récifs coralliens dans le monde entier. Les coraux tolérants au stress peuvent s'adapter à un réchauffement des mers mais, comme le montre une nouvelle étude, ils perdent leur capacité d'adaptation s'ils sont exposés à des stress supplémentaires. L'effet toxique de la chaleur sur les coraux tolérants au stress était ainsi renforcé lorsqu'elle était combinée à une exposition à un herbicide, la prométryne, à des concentrations équivalentes à celles rencontrées dans l'environnement. Dans le contexte du stress thermique, il convient donc de porter attention aux éventuels stress supplémentaires.

Zhou, Y. et al. (2024) Environmental Concentrations of Herbicide Prometryn Render Stress-Tolerant Corals Susceptible to Ocean Warming. *Environmental Science & Technology* 2024 58 (10), 4545-4557

## **Des pesticides utilisés dans la culture du pommier retrouvés en haute montagne**

La dispersion des pesticides par voie aérienne est largement sous-estimée. Une nouvelle étude venue d'Italie montre que les pesticides utilisés dans le bassin de production de pommes du Val Venosta, dans le Haut Adige, ne restent pas dans la zone de production fruitière. Ils se dispersent dans toute la vallée et sont transportés jusqu'en haute altitude, dans des zones de montagne sensibles et protégées. Ainsi, ils n'agissent pas uniquement dans la zone de production mais nuisent à des écosystèmes tout entiers.

Brühl, C.A. et al. (2024) Widespread contamination of soils and vegetation with current use pesticide residues along altitudinal gradients in a European Alpine valley. *Communications Earth & Environment* 5, 72

## **Surveillance de la qualité de l'eau avec le test de toxicité mitochondriale MitoOxTox**

Les mitochondries jouent un rôle clé dans la production énergétique des cellules. Toutefois, leurs fonctions peuvent être perturbées par les polluants. Un nouveau bioessai *in vitro* avec une lignée de cellules humaines permet de mesurer la toxicité mitochondriale dans les échantillons d'eau à travers la perturbation du potentiel membranaire mitochondrial. Le nouveau test a été appliqué à des échantillons d'eaux usées, d'eaux naturelles de surface, d'eau du robinet et d'eau embouteillée de divers pays européens. Il s'est avéré que les échantillons prélevés en entrée et en sortie des

stations d'épuration avaient un effet spécifique sur le potentiel membranaire mitochondrial. Le nouveau bioessai apporte ainsi un complément précieux aux batteries de tests *in vitro* pour l'évaluation de la qualité des eaux.

Lee, J. et al. (2024) Water Quality Monitoring with the Multiplexed Assay MitoOxTox for Mitochondrial Toxicity, Oxidative Stress Response, and Cytotoxicity in AREc32 Cells. *Environmental Science & Technology* 2024 58 (13), 5716-5726

## **La contamination des eaux par les PFAS mondialement sous-estimée**

Les PFAS (substances per et polyfluoroalkylées) sont détectées partout dans notre environnement. Leur toxicité pour les humains et l'environnement est source de vive inquiétude, ce qui s'est traduit par un durcissement significatif de leur réglementation, en particulier au Canada et aux États-Unis. Dans une nouvelle étude, les données de plus de 45'000 échantillons d'eau de surface et souterraine collectés dans le monde entier ont été compilées pour évaluer l'étendue de la contamination aux PFAS sur la planète. Une part considérable des eaux analysées présentaient des teneurs en PFAS supérieures aux seuils en vigueur pour l'eau potable, l'ampleur des dépassements dépendant naturellement des réglementations locales et des sources de PFAS. À noter que la contamination de l'environnement par les PFAS est sous-estimée par les méthodes actuelles de surveillance car seules les substances prises en compte dans la législation sont quantifiées.

Ackerman Grunfeld, D. et al. (2024) Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface waters and groundwaters. *Nature Geoscience* 17, 340-346

## **Les chouettes et autres rapaces nocturnes contaminés par les rodenticides**

Dans une étude australienne, différents anticoagulants ont été recherchés chez 60 rapaces nocturnes chassant dans différents types de milieux. Les anticoagulants inhibent la coagulation du sang et sont utilisés pour lutter contre les rats et les souris mais ils peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Ces rodenticides ont ainsi été détectés dans le foie de 92 % des volatiles étudiés. Chez 33 à 80 % des rapaces, leurs concentrations étaient telles que des effets toxiques ne pouvaient être exclus. Les espèces ne se nourrissant pas essentiellement de rongeurs présentaient des teneurs similaires à celles dont ils constituent la nourriture principale. Les anticoagulants peuvent ainsi constituer une menace potentielle pour la survie des populations de rapaces.

Cooke, R. et al (2023) Silent killers? The widespread exposure of predatory nocturnal birds to anticoagulant rodenticides. *Science of The Total Environment*, 904, 166293

### **Impressum**

**Editeur:** Centre Ecotox

Eawag

Überlandstrasse 133

8600 Dübendorf

Suisse

Tél. +41 58 765 5562

Fax +41 58 765 5863

www.oekotoxzentrum.ch

EPFL-ENAC-IIE-GE

Station 2

1015 Lausanne

Suisse

Tél. +41 21 693 6258

Fax +41 21 693 8035

www.centreecotox.ch

**Rédaction:** Anke Schäfer, Centre Ecotox

**Traductions:** Laurence Frauenlob-Puech, D-Waldkirch

**Copyright:** © Les textes et les photos non marqués autrement sont soumis à la licence Creative Commons « Attribution 4.0 International ». Ils peuvent être librement copiés, distribués et modifiés, à la condition de les attribuer à l'auteur en citant son nom. Plus d'informations sur la licence sur le site [www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/](http://www.creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**Copyright des photos:** Centre Ecotox, Adobe Stock (p.7, 10, 11), Peter Penicka, Eawag (p.9)

**Maquette, graphisme et mise en page:** visu'1 AG identity, Langenthal

**Abonnements et changements d'adresse:** Bienvenue à tout(e) nouvel(le) abonné(e), [info@centreecotox.ch](mailto:info@centreecotox.ch)