

Automatisation de l'analyse de vidéos comportementales en écotoxicologie : solutions basées sur les logiciels libres

Introduction

Les mouvements et comportements des animaux sont souvent considérés comme les réponses les plus sensibles et les plus précoces face à l'exposition à un stress, y compris chimique (Peterson et al., 2017; Wong and Candolin, 2015). Pourtant, alors que les altérations comportementales peuvent avoir des effets importants sur les performances des individus (Jacquin et al., 2020; Wong and Candolin, 2015), les effets des contaminants sur les traits comportementaux ont jusqu'ici été largement négligés (Ågerstrand et al., 2020; Bertram et al., 2022; Ford et al., 2021). L'utilisation croissante des tests comportementaux en écotoxicologie comporte cependant de nombreux défis techniques. Ils nécessitent, pour la plupart, l'utilisation de matériel vidéo avec un temps de traitement souvent conséquent. Pour y remédier, de nombreuses solutions logicielles sont maintenant disponibles allant de l'aide au scoring manuel jusqu'à l'automatisation complète de la détection des individus et de leurs comportements. Nous synthétisons ici plusieurs de ces solutions avec une emphase sur les logiciels libres en détaillant les avantages et inconvénients de ces différents outils (Tableau 1, pour un descriptif plus détaillé des capacités des différents logiciels existants, voir également Panadeiro et al. 2021).

Effets des contaminants sur les réponses comportementales

Les traits comportementaux s'expriment à l'interface entre l'individu et son environnement. Une altération comportementale engendrée par une exposition à un contaminant peut ainsi se traduire par une baisse de performance. Par exemple, l'exposition à un pesticide peut réduire l'activité de nage des poissons (Shuman-Goodier and Propper, 2016) avec des conséquences sur leur capacité à fuir leur prédateur (Sandoval-Herrera et al., 2019). Ces altérations peuvent également affecter directement l'interaction des individus avec leurs partenaires sociaux ou leurs proies et prédateurs. Les pesticides peuvent ainsi réduire l'activité de prédation et les soins parentaux apportés aux œufs chez des insectes sociaux facultatifs (Pince-oreille - *Forficula auricularia*) (Malagnoux et al., 2015; Meunier et al., 2020). De même, le comportement d'approvisionnement des perches augmente en présence d'une exposition aux anxiolytiques (Brodin et al., 2013). Certains perturbateurs endocriniens, quant à eux, sont connus pour affecter le comportement reproducteur des guppys (*Poecilia reticulata*) avec des conséquences potentielles sur l'accès à la reproduction (Bertram et al., 2020, 2015; Tomkins et al., 2018).

La modification de certains traits comportementaux lors de l'exposition à des contaminants peut également s'accompagner d'altérations cognitives (Jacquin et al., 2020; Shettleworth, 2010), affectant la mémoire et la capacité d'apprentissage des individus (Siviter et al., 2018). Par exemple, l'exposition à de l'aluminium, peut réduire la capacité des Saumons (*Salmo salar*) à mémoriser la sortie

d'un labyrinthe. En modifiant les capacités cognitives des individus, les contaminants peuvent donc altérer leur aptitude à se déplacer/se repérer dans l'espace avec des conséquences potentielles sur leur capacité à trouver de la nourriture ou bien à en évaluer la qualité. Par exemple, l'exposition chronique à du plomb peut réduire les capacités d'apprentissage des abeilles (*Apis mellifera*) en altérant leur capacité à changer de ressource florale en fonction de leur valeur nutritionnelle (Monchanin et al., 2021). Aussi, les contaminants sont susceptibles d'affecter les interactions entre congénères et affecter la transmission d'informations au sein d'un groupe (Michelangeli et al., 2022).

Si les effets délétères des contaminants sur le comportement et les capacités cognitive des organismes sont maintenant bien démontrés (e.g., Bertram et al., 2022; Ford et al., 2021; Jacquin et al., 2020; Saaristo et al., 2018), la grande majorité des études se sont, à ce jour, intéressées aux effets moyens des contaminants sur les traits comportementaux. Un nombre croissant d'études met également en évidence des effets plus subtils sur la variation individuelle et les relations entre traits comportementaux. Par exemple, l'exposition aux insecticides chez les araignées sauteuses (*Eris militaris*) provoque des changements importants de flexibilité individuelle (la capacité des individus à moduler leurs réponses comportementales entre mesures), ceci même en l'absence de différences moyennes (Royauté et al., 2015). Plus récemment, Polverino et al., 2021 ont montré une réduction de la variabilité d'activité entre individus chez les guppys suite à une exposition à un antidépresseur. Ces deux exemples suggèrent que les contaminants sont susceptibles d'avoir des répercussions sur la capacité des individus à s'adapter à des altérations de leur environnement, et donc sur la persistance des populations dans un contexte de changements globaux.

Les contaminants affectent donc les traits comportementaux sous différents aspects, avec des effets en cascade attendus sur la performance des individus et leur capacité à s'adapter en environnement changeant, les interactions entre congénères, les relations proies-prédateurs et plus globalement le fonctionnement des écosystèmes. Cependant mesurer ces altérations comportementales peut nécessiter la mise en place de design expérimentaux relativement lourds, ainsi qu'un temps non-négligeable d'observation ou d'analyse vidéo, étape souvent fastidieuse. Aujourd'hui un certain nombre d'avancées technologiques permettent de lever ces contraintes.

Innovations technologiques au service de l'écotoxicologie comportementale

Scoring manuel

Les mesures comportementales sont typiquement réalisées à l'aide de tests standardisés requérant soit des mesures manuelles ou un phénotypage sur la base de fichiers vidéos. Des logiciels open-source tels que [JWatcher](#) (Blumstein and Daniel, 2007) et [BORIS](#) (Friard and Gamba, 2016) existent depuis plusieurs décennies pour faciliter l'acquisition de ces données. Cependant, le phénotypage reste basé sur des actions manuelles (activation de touches sur le clavier, Figure 1) et devient rapidement chronophage lorsque le volume de données à traiter dépasse quelques dizaines d'heures d'enregistrement. De plus, ce type d'analyses peut également souffrir d'importants biais observateurs en absence de métriques comportementales bien définies (Anderson and Perona, 2014).

Analyses de trajectoires sous la soustraction du bruit de fond

Les avancées technologiques et méthodologiques de ces dernières années permettent de faciliter l'acquisition des données à l'aide de méthodes d'analyses assistées par ordinateur ("computer vision" et "video-tracking"). Ainsi, des logiciels comme [AnimalTA](#) ou [ToxTrac](#) permettent de digitaliser automatiquement les trajectoires des individus à partir des fichiers vidéos. La plupart de ces logiciels sont basés sur des algorithmes simples de soustraction du bruit de fond. Ceci permet d'isoler l'individu en mouvement du fond de l'arène de test et de reconstruire les coordonnées dans le plan X,Y de l'individu à chaque image de la vidéo (Figure 1). Ce type d'approche permet de facilement extraire différentes métriques d'intérêt (distance parcourue, angle de virages, proportion de l'arène explorée, distance inter-individus). A noter que certains logiciels comme [AnimalTA](#) fonctionnent également de façon adéquate lorsque plusieurs individus sont présents dans la même arène de test ou en conditions de lumière naturelle.

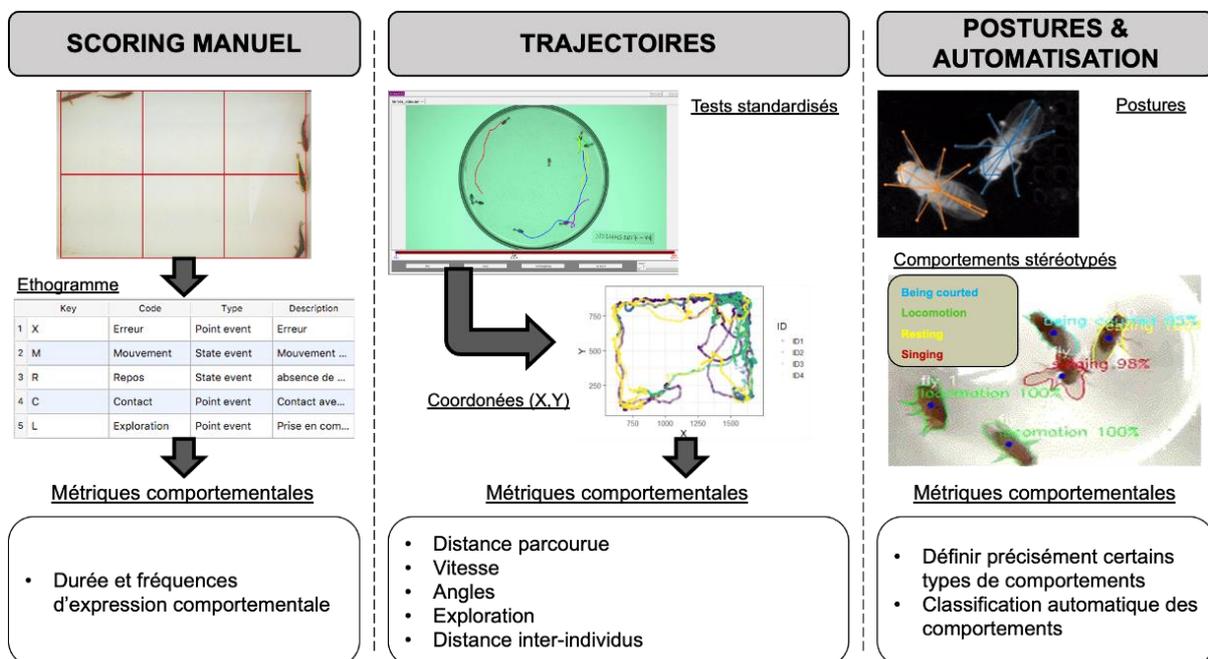


Figure 1. Récapitulatif des grands types de méthodes permettant d'obtenir des informations sur le comportement animal. Scoring manuel: Éthogramme réalisé sur [BORIS](#). Trajectoires: tracking réalisé à l'aide d'[AnimalTA](#). Postures & automatisation, exemples tirés de [SLEAP](#) et [LabGym](#).

Solutions basées sur les intelligences artificielles (IA)

- Trajectoires complexes en arènes multi-individus

Lorsque le nombre d'individus à suivre au sein d'une même arène augmente de façon importante le risque de rencontre et donc de collisions entre individus augmente sensiblement ce qui peut conduire à la permutation de l'identité entre ces individus voir même à l'attribution d'une nouvelle identité.

Ces collisions peuvent introduire un biais non négligeable dans les résultats, en particulier dans le cadre d'analyses individus-centrées. Bien que certains logiciels permettent la correction manuelle de ces erreurs d'assignation, cette étape reste fastidieuse en fonction du nombre d'individus suivis et de la durée de la vidéo. Pour pallier à ces déficiences, qui demeurent l'un des principaux challenges actuels dans le cadre des approches de video-tracking, des solutions intégrant le recours à des algorithmes d'Intelligence Artificielle (IA) ont récemment été développées ([idtracker.ai](#), [TRex](#)). L'entraînement de ces algorithmes peut alors se baser sur des portions de la vidéo ou les identités des individus sont certaines (peu de collisions) ou bien sur des portions annotées manuellement comme c'est le cas du logiciel [TRex](#) par exemple.

- Analyses de postures et automatisation de la détection des comportements

L'analyse de trajectoire, se limitant au seul déplacement des individus, reste un outil relativement limité lorsqu'il s'agit de décrire des comportements complexes. Ainsi, des traits comportementaux comme l'acquisition de ressource alimentaire ou les interactions sociales sont plus difficiles à capturer avec ces logiciels. De nouvelles générations d'IA, inspirées de la "motion capture", permettent maintenant de suivre non pas simplement le déplacement des individus, mais l'ensemble des postures des individus (Figure 1). Ces logiciels tels [SLEAP](#) ou [DeapLabCut](#) fonctionnent en entraînant l'IA à identifier et tracer le mouvement de différents marqueurs (e.g., tête, tronc et queue chez les rongeurs, différentes articulations des pattes chez la drosophile). Ce suivi de pose comportementale promet une véritable révolution dans la discipline en ouvrant la porte à une classification complètement automatisée des comportements (voir par exemple [LabGym](#), Figure 1).

Nouvelles possibilités pour l'écotoxicologie comportementale

Les développements technologiques décrits ouvrent la voie vers de nouveaux dispositifs expérimentaux et à de nouvelles questions en écotoxicologie comportementale. L'augmentation des capacités de tracking permet d'entrevoir dès aujourd'hui l'évolution des tests comportementaux standardisés, jusqu'ici souvent conduits dans des enceintes séparées des élevages, vers des dispositifs de surveillance en temps réel du comportement des individus. Ce type de dispositif permettrait ainsi de suivre en continu une communauté d'individus en présence / absence de contaminants sur plusieurs jours voire mois. Ce type de suivi à "long" terme ayant déjà été réalisé par exemple lors d'expérimentations visant à étudier l'ontogenèse du comportement (Bierbach et al. 2017). De tels dispositifs auraient l'avantage de permettre un suivi moins invasif des individus tout en quantifiant l'étendue et la durée des altérations comportementales suite à une exposition. De même, les possibilités liées à l'analyse de postures permettraient une détection automatique des comportements les plus fortement altérés suite à une exposition, facilitant par la suite le recours à l'IA afin d'identifier des comportements stéréotypés typiques de l'exposition aux contaminants (selon leur mode d'action par exemple).

Ces avancées technologiques promettent ainsi d'augmenter l'intégration des indicateurs comportementaux dans l'évaluation du risque environnemental en améliorant la fiabilité et la précision des tests comportementaux au laboratoire.

Nouveaux défis

Alors que l'acquisition de données à haut débit se généralise et que la durée et le nombre de tests comportementaux menés sur un même groupe d'individus augmente, les besoins en termes de capacités de stockage et de calcul ne cessent de croître nécessitant des infrastructures spécifiques (serveurs de stockage, cluster de calculs). De plus, l'analyse et l'interprétation des données vidéos à des résolutions toujours plus fines restent difficiles en raison de leur complexité, leur hétérogénéité et du bruit de fond qui peut subsister (Petitjean et al., 2024). Pour ces raisons, des solutions ont récemment été développées sous la forme de packages R en vue d'offrir des procédures reproductibles pour nettoyer et filtrer les données de tracking ([celltrackR](#), Wortel et al., 2021) ou calculer les métriques associées ([trajr](#): McLean and Skowron Volponi, 2018; [sftrack](#): Boone et al., 2023). Plus récemment, l'implémentation du package [MoveR](#) (Petitjean et al., 2024) a ouvert la possibilité d'importer les données de différents logiciels, de détecter et filtrer les artéfacts et erreurs de tracking, de générer/gérer des zones d'intérêt (emplacement de nourriture par exemple) et d'identifier des motifs de changement de zones ainsi que de calculer de nombreuses métriques et d'analyser des tendances temporelles, le tout dans le cadre d'un pipeline d'analyse complet.

Alors que les solutions de vidéo-tracking se sont, jusqu'à aujourd'hui, essentiellement focalisées sur des approches en conditions contrôlées, l'une des perspectives de ces approches pourrait résider dans le suivi comportemental des individus en milieu naturel en vue d'améliorer le réalisme des approches en écotoxicologie comportementale. Cependant, de nombreux obstacles se dressent afin de relever ce défi (Koger et al., 2023; Tuia et al., 2022). Par exemple, la forte variabilité des conditions d'éclairage, les vibrations/mouvements involontaires de la caméra, la disparition/l'apparition d'individus du champ de la vidéo, ainsi que l'hétérogénéité de l'arrière-plan sont autant de contraintes potentielles à l'acquisition d'enregistrements vidéo de qualité suffisante pour permettre le suivi d'individus dans le milieu naturel. Ces conditions étant extrêmement variables, les méthodes de soustraction de background et de seuillage de couleurs classiquement utilisées en vidéo-tracking ne sont généralement pas efficaces. Encore une fois; les avancées technologiques récentes et à venir pourraient permettre de s'affranchir de ces problèmes. En effet, bien qu'encore peu développée, l'utilisation de réseaux de neurones convolutionnels, conçus pour apprendre et reconnaître des motifs spatiaux, dans le cadre d'approche de vidéo-tracking peut permettre de détecter des individus dans des environnements hétérogènes (Multi-Object Tracking in Heterogeneous environments - [MOTHe](#); Rathore et al., 2023) et d'ouvrir la voie à de nouvelles possibilités de diagnostic des effets des contaminants sur les individus dans le milieu naturel (Figure 2).

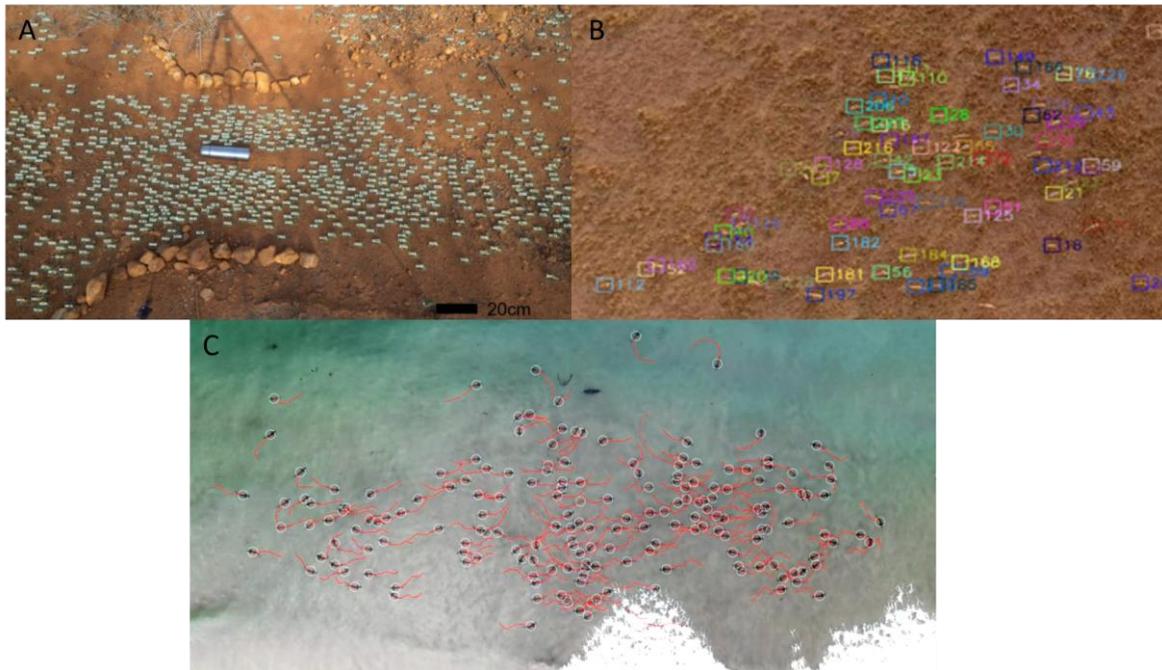


Figure 2. Exemples de suivis multi-individus dans le milieu naturel, effectués à l'aide de méthodes de vidéo-tracking. **A** – Criquets détectés avec l'Interface de Programmation d'Application (API) Facebook AI's detectron2 (adapté de Gorbonos et al., 2024); **B** – Troupeau d'antilopes cervicapres suivis avec le logiciel MOTHe (adapté de Rathore et al., 2023); **C** – Requins léopards (*Triakis semifasciata*) suivis avec le logiciel TRex (© [Andrew Nosal](#)).

Conclusion

En résumé, la reconnaissance récente du caractère intégrateur des traits comportementaux en vue d'évaluer l'état de santé des individus face à des contaminants constitue un atout considérable dans le cadre d'études en écotoxicologie. De plus, les traits comportementaux étant à l'interface entre l'individu et son environnement, leur altération en présence de contaminants est susceptible d'affecter le fonctionnement des écosystèmes. Le développement de l'écotoxicologie comportementale peut donc permettre à l'écotoxicologie de se rapprocher des conditions du milieu, par exemple, en permettant la mise en place de dispositifs de surveillance et d'alerte précoce basés sur la détection d'anomalies comportementales (e.g., [ToxMate](#), [LabGym](#)).

Bien que jusqu'à récemment, les verrous technologiques étaient nombreux, les avancées réalisées au cours de la dernière décennie et l'essor de l'IA permettent dorénavant de formuler de nouvelles hypothèses et de les tester à la fois en conditions contrôlées et dans le milieu naturel avec une résolution inégalée, et ce en utilisant de nouvelles approches innovantes (voir tableau 1) au service d'une écotoxicologie plus Intégrative.



Tableau 1. Récapitulatif non-exhaustif des logiciels d'analyse du comportement et les principaux outils qu'ils offrent.

Logiciel	Multi-arènes	Multi-individus	Automatisation	Intelligence Artificielle	Analyse de postures	Interactions sociales	Référence
BORIS	✓	✓	×	×	×	✓	(Friard and Gamba, 2016)
JWatcher	✓	✓	×	×	×	✓	(Blumstein and Daniel, 2007)
Ctrax	×	✓	✓	×	×	✓	(Branson et al., 2009)
TrackR	✓	✓	✓	×	×	✓	https://github.com/swarm-lab/trackR
ToxTrac	✓	✓	✓	×	×	✓	(Rodriguez et al., 2018)
Tracktor	✓	✓	✓	×	×	✓	(Sridhar et al., 2019)
AnimalTA	✓	✓	✓	×	×	✓	(Chiara and Kim, 2023)
IdTracker.ai	✓	✓	✓	✓	×	✓	(Romero-Ferrero et al., 2019)
TRex	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(Walter and Couzin, 2021)
SLEAP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(Pereira et al., 2022)
DeepLabCut	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(Lauer et al., 2022; Mathis et al., 2018)
LabGym	×	✓	✓	✓	×	✓	(Hu et al., 2023)

Contacts

Quentin Petitjean¹ et Raphaël Royauté²

¹UR Ecosystèmes Aquatiques Et Changements Globaux, INRAE
Nouvelle-Aquitaine Bordeaux

²UMR Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des
agroécosystèmes, INRAE Versailles-Saclay



Bibliographie citée

- Ågerstrand, M., Arnold, K., Balshine, S., Brodin, T., W. Brooks, B., Maack, G., S. McCallum, E., Pyle, G., Saaristo, M., T. Ford, A., 2020. Emerging investigator series: use of behavioural endpoints in the regulation of chemicals. *Environmental Science: Processes & Impacts* 22, 49–65. <https://doi.org/10.1039/C9EM00463G>
- Anderson, D.J., Perona, P., 2014. Toward a Science of Computational Ethology. *Neuron* 84, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.09.005>
- Bertram, M.G., Martin, J.M., McCallum, E.S., Alton, L.A., Brand, J.A., Brooks, B.W., Cerveny, D., Fick, J., Ford, A.T., Hellström, G., Michelangeli, M., Nakagawa, S., Polverino, G., Saaristo, M., Sih, A., Tan, H., Tyler, C.R., Wong, B.B.M., Brodin, T., 2022. Frontiers in quantifying wildlife behavioural responses to chemical pollution. *Biological Reviews* n/a. <https://doi.org/10.1111/brv.12844>
- Bertram, M.G., Saaristo, M., Baumgartner, J.B., Johnstone, C.P., Allinson, M., Allinson, G., Wong, B.B.M., 2015. Sex in troubled waters: Widespread agricultural contaminant disrupts reproductive behaviour in fish. *Hormones and Behavior* 70, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2015.03.002>
- Bertram, M.G., Tomkins, P., Saaristo, M., Martin, J.M., Michelangeli, M., Tomkins, R.B., Wong, B.B.M., 2020. Disruption of male mating strategies in a chemically compromised environment. *Science of The Total Environment* 703, 134991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134991>
- Bierbach, D., Laskowski, K. & Wolf, M. Behavioural individuality in clonal fish arises despite near-identical rearing conditions. *Nat Commun* 8, 15361 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms15361>
- Blumstein, D.T., Daniel, J.C., 2007. *Quantifying behavior the JWatcher way*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass.
- Boone, M., Joo, R., Basille, M., 2023. sfrack: Modern Classes for Tracking and Movement Data. <https://mablab.org/sfrack/>. R package version 0.5.4. <https://CRAN.r-project.org/package=sfrack>. [Accessed February 26, 2024].
- Branson, K., Robie, A.A., Bender, J., Perona, P., Dickinson, M.H., 2009. High-throughput ethomics in large groups of *Drosophila*. *Nat Methods* 6, 451–457. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1328>
- Brodin, T., Fick, J., Jonsson, M., Klaminder, J., 2013. Dilute Concentrations of a Psychiatric Drug Alter Behavior of Fish from Natural Populations. *Science* 339, 814–815. <https://doi.org/10.1126/science.1226850>
- Chiara, V., Kim, S.-Y., 2023. AnimalTA: A highly flexible and easy-to-use program for tracking and analysing animal movement in different environments. *Methods in Ecology and Evolution* 14, 1699–1707. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14115>
- Ford, A.T., Ågerstrand, M., Brooks, B.W., Allen, J., Bertram, M.G., Brodin, T., Dang, Z., Duquesne, S., Sahm, R., Hoffmann, F., Hollert, H., Jacob, S., Klüver, N., Lazorchak, J.M., Ledesma, M., Melvin, S.D., Mohr, S., Padilla, S., Pyle, G.G., Scholz, S., Saaristo, M., Smit, E., Steevens, J.A., van den Berg, S., Kloas, W., Wong, B.B.M., Ziegler, M., Maack, G., 2021. The Role of Behavioral Ecotoxicology in Environmental Protection. *Environ. Sci. Technol.* 55, 5620–5628. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06493>
- Friard, O., Gamba, M., 2016. BORIS: a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods in Ecology and Evolution* 7, 1325–1330. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584>
- Gorbonos, D., Oberhauser, F.B., Costello, L.L., Günzel, Y., Couzin-Fuchs, E., Koger, B., Couzin, I.D., 2024. An effective hydrodynamic description of marching locusts. *Phys. Biol.* 21, 026004. <https://doi.org/10.1088/1478-3975/ad2219>
- Hu, Y., Ferrario, C.R., Maitland, A.D., Ionides, R.B., Ghimire, A., Watson, B., Iwasaki, K., White, H., Xi, Y., Zhou, J., Ye, B., 2023. LabGym: Quantification of user-defined animal behaviors using learning-based holistic assessment. *Cell Reports Methods* 3. <https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2023.100415>
- Jacquin, L., Petitjean, Q., Côte, J., Laffaille, P., Jean, S., 2020. Effects of Pollution on Fish Behavior, Personality, and Cognition: Some Research Perspectives. *Front. Ecol. Evol.* 8, 86. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00086>
- Koger, B., Deshpande, A., Kerby, J.T., Graving, J.M., Costelloe, B.R., Couzin, I.D., 2023. Quantifying the movement, behaviour and environmental context of group-living animals using drones and computer vision. *Journal of Animal Ecology* 92, 1357–1371. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13904>
- Lauer, J., Zhou, M., Ye, S., Menegas, W., Schneider, S., Nath, T., Rahman, M.M., Di Santo, V., Soberanes, D., Feng, G., Murthy, V.N., Lauder, G., Dulac, C., Mathis, M.W., Mathis, A., 2022. Multi-animal pose estimation, identification and tracking with DeepLabCut. *Nat Methods* 19, 496–504. <https://doi.org/10.1038/s41592-022-01443-0>
- Malagnoux, L., Capowiez, Y., Rault, M., 2015. Impact of insecticide exposure on the predation activity of the European earwig *Forficula auricularia*. *Environ Sci Pollut Res* 22, 14116–14126. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4520-9>

- Mathis, A., Mamidanna, P., Cury, K.M., Abe, T., Murthy, V.N., Mathis, M.W., Bethge, M., 2018. DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning. *Nat Neurosci* 21, 1281–1289. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0209-y>
- McLean, D.J., Skowron Volponi, M.A., 2018. trajr: An R package for characterisation of animal trajectories. *Ethology* 124, 440–448. <https://doi.org/10.1111/eth.12739>
- Meunier, J., Dufour, J., Van Meyel, S., Rault, M., Lécureuil, C., 2020. Sublethal exposure to deltamethrin impairs maternal egg care in the European earwig *Forficula auricularia*. *Chemosphere* 258, 127383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127383>
- Michelangeli, M., Martin, J.M., Pinter-Wollman, N., Ioannou, C.C., McCallum, E.S., Bertram, M.G., Brodin, T., 2022. Predicting the impacts of chemical pollutants on animal groups. *Trends in Ecology & Evolution* 37, 789–802. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.05.009>
- Monchanin, C., Blanc-Brude, A., Drujon, E., Negahi, M.M., Pasquaretta, C., Silvestre, J., Baqué, D., Elger, A., Barron, A.B., Devaud, J.-M., Lihoreau, M., 2021. Chronic exposure to trace lead impairs honey bee learning. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 212, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112008>
- Panadeiro, A., Rodriguez, J., Henry, D., Wlodkovic, M., Andersson, A., 2021. A review of 28 free animal tracking software applications: current features and limitations. *Lab Anim.* (2021) 1–9. 434. <https://doi.org/10.1038/s41684-021-00811-1>
- Pereira, T.D., Tabris, N., Matsliah, A., Turner, D.M., Li, J., Ravindranath, S., Papadoyannis, E.S., Normand, E., Deutsch, D.S., Wang, Z.Y., McKenzie-Smith, G.C., Mitelut, C.C., Castro, M.D., D’Uva, J., Kislin, M., Sanes, D.H., Kocher, S.D., Wang, S.-H., Falkner, A.L., Shaevitz, J.W., Murthy, M., 2022. SLEAP: A deep learning system for multi-animal pose tracking. *Nat Methods* 19, 486–495. <https://doi.org/10.1038/s41592-022-01426-1>
- Peterson, E.K., Buchwalter, D.B., Kerby, J.L., LeFauve, M.K., Varian-Ramos, C.W., Swaddle, J.P., 2017. Integrative behavioral ecotoxicology: bringing together fields to establish new insight to behavioral ecology, toxicology, and conservation. *Curr Zool* 63, 185–194. <https://doi.org/10.1093/cz/zox010>
- Petitjean, Q., Lartigue, S., Cointe, M., Ris, N., Calcagno, V., 2024. MoveR: An R package for easy processing and analysis of animal video-tracking data. *SoftwareX* 26, 101674. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101674>
- Polverino, G., Martin, J.M., Bertram, M.G., Soman, V.R., Tan, H., Brand, J.A., Mason, R.T., Wong, B.B.M., 2021. Psychoactive pollution suppresses individual differences in fish behaviour. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 288, 20202294. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2294>
- Rathore, A., Sharma, A., Shah, S., Sharma, N., Torney, C., Guttal, V., 2023. Multi-Object Tracking in Heterogeneous environments (MOTHe) for animal video recordings. *PeerJ* 11, e15573. <https://doi.org/10.7717/peerj.15573>
- Rodriguez, A., Zhang, H., Klaminder, J., Brodin, T., Andersson, P.L., Andersson, M., 2018. ToxTrac: A fast and robust software for tracking organisms. *Methods in Ecology and Evolution* 9, 460–464. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12874>
- Romero-Ferrero, F., Bergomi, M.G., Hinz, R.C., Heras, F.J.H., de Polavieja, G.G., 2019. idtracker.ai: tracking all individuals in small or large collectives of unmarked animals. *Nat Methods* 16, 179–182. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0295-5>
- Royauté, R., Buddle, C.M., Vincent, C., 2015. Under the influence: sublethal exposure to an insecticide affects personality expression in a jumping spider. *Functional Ecology* 29, 962–970. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12413>
- Saaristo, M., Brodin, T., Balshine, S., Bertram, M.G., Brooks, B.W., Ehlman, S.M., McCallum, E.S., Sih, A., Sundin, J., Wong, B.B.M., Arnold, K.E., 2018. Direct and indirect effects of chemical contaminants on the behaviour, ecology and evolution of wildlife. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285, 20181297. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1297>
- Sandoval-Herrera, N., Mena, F., Espinoza, M., Romero, A., 2019. Neurotoxicity of organophosphate pesticides could reduce the ability of fish to escape predation under low doses of exposure. *Sci Rep* 9, 10530. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46804-6>
- Shettleworth, S.J., 2010. *Cognition, evolution, and behavior*, 2nd ed. ed. Oxford University Press, Oxford ; New York.
- Shuman-Goodier, M.E., Propper, C.R., 2016. A meta-analysis synthesizing the effects of pesticides on swim speed and activity of aquatic vertebrates. *Science of The Total Environment* 565, 758–766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.205>
- Siviter, H., Koricheva, J., Brown, M.J.F., Leadbeater, E., 2018. Quantifying the impact of pesticides on learning and memory in bees. *Journal of Applied Ecology* 55, 2812–2821. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13193>
- Sridhar, V.H., Roche, D.G., Gingins, S., 2019. Tracktor: Image-based automated tracking of animal movement and behaviour. *Methods in Ecology and Evolution* 10, 815–820. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13166>
- Tomkins, P., Saaristo, M., Bertram, M.G., Michelangeli, M., Tomkins, R.B., Wong, B.B.M., 2018. An endocrine-disrupting agricultural contaminant impacts sequential female mate choice in fish. *Environmental Pollution* 237, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.046>
- Tuia, D., Kellenberger, B., Beery, S., Costelloe, B.R., Zuffi, S., Risse, B., Mathis, A., Mathis, M.W., van Langevelde, F., Burghardt, T., Kays, R., Klinck, H., Wikelski, M., Couzin, I.D., van Horn, G., Crofoot, M.C., Stewart, C.V., Berger-Wolf, T., 2022. Perspectives in machine learning for wildlife conservation. *Nat Commun* 13, 792. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27980-y>
- Walter, T., Couzin, I.D., 2021. TRex, a fast multi-animal tracking system with markerless identification, and 2D estimation of posture and visual fields. *eLife* 10, e64000. <https://doi.org/10.7554/eLife.64000>
- Wong, B.B.M., Candolin, U., 2015. Behavioral responses to changing environments. *Behavioral Ecology* 26, 665–673. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru183>
- Wortel, I.M.N., Liu, A.Y., Dannenberg, K., Berry, J.C., Miller, M.J., Textor, J., 2021. CelltrackR: An R package for fast and flexible analysis of immune cell migration data. *Immunoinformatics (Amst)* 1–2, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.immuno.2021.100003>