



Université de La Rochelle

Faculté de Sciences et Technologies,
Avenue Michel Crépeau, 17000 LA ROCHELLE

Licence Science de la Vie

Parcours Biologie des Ecosystèmes Marins

**Évaluation des effets des filtres ultraviolet (FUV)
issus de crèmes solaires sur les comportements
de vigilance et de camouflage de la seiche
commune (*Sepia officinalis*)**

Mathis Freullet

Etude réalisée au LIENSs

Sous la responsabilité de Christel Lefrançois et Benjamin Bellier

Année 2025

Résumé

Dans un contexte de pollution grandissante dans les écosystèmes côtiers, la pollution par les crèmes solaires et composés associés alerte de plus en plus. Cependant, peu d'études d'évaluation du risque toxique considèrent l'ensemble des produits chimiques formant les crèmes solaires et des concentrations et espèces pertinentes du point de vue environnemental. Ainsi, cette étude propose d'évaluer les potentiels impacts environnementaux causés par les composés présents dans les crèmes solaires (matrice de crème solaire, filtres UV organiques et filtres UV minéraux), notamment les filtres UV, sur la seiche commune (*Sepia officinalis*), une espèce d'intérêt économique et écologique. Dans un contexte de pollution grandissante dans les écosystèmes côtiers, des seiches juvéniles ont donc été exposées à des concentrations environnementalement pertinentes pour cinq conditions expérimentales d'exposition distinctes : crème solaire complète (matrice + filtres UV organiques + filtres UV minéraux), crème solaire complète (COMP), matrice seule (MATR), matrice + filtres UV organiques (FUVo), matrice + filtres UV minéraux (FUVm) et contrôle (sans matrice et filtres UV, CONTR). Les paramètres analysés étaient la surviemortalité, la croissance et le comportement (notamment la latéralisation et le camouflage) des seiches juvéniles. En comparant les résultats à la condition CONTR, les résultats ont montré une mortalité significativement supérieure observée pour la condition COMP, ce qui n'a pas permis d'avoir suffisamment d'individus statistiques pour les autres indicateurs de croissance et de comportement pour cette condition. Et le camouflage s'est révélé être quant à lui significativement moins efficace pour les conditions MATR et FUVo. Notre étude a donc mis en évidence des effets nocifs néfastes en mélange des composants chimiques des crèmes solaires sur les seiches juvéniles et a également indiqué un effet cocktail potentiel de ces formations chimiques. Il est donc nécessaire pour les études à venir de considérer les effets de l'ensemble des composés chimiques, seuls ou combinés, afin d'évaluer correctement et plus rigoureusement les impacts environnementaux et sociaux économiques possibles.

Remerciements

Je tiens à remercier profondément Christel Lefrançois et Benjamin Bellier qui m'ont accompagné durant toute la durée du stage. Bien qu'on ne se soit pas souvent vu, votre disponibilité et vos conseils précieux m'ont permis d'apprendre beaucoup de choses en peu de temps. Merci de m'avoir permis de sortir du cadre de mon stage pour découvrir d'autres aspects de la recherche (et merci pour la chaise de bureau !).

Je remercie également Julie Charrier qui a gentiment accepté d'être ma tutrice de stage et m'a donc permis de réaliser ce stage. Nous ne nous sommes pas entretenus souvent, mais je sais que vous auriez été disponible en cas de besoin.

Ensuite, je tiens à remercier l'ensemble de l'université de La Rochelle, qui, par le biais de sa formation, nous permet à tous de réaliser un stage de fin de licence dans de bonnes conditions, ce qui n'est pas le cas dans toutes les universités.

Je remercie également l'ensemble des enseignants que j'ai pu avoir durant ma licence, que ce soit à l'université d'Angers ou de La Rochelle, pour m'avoir transmis toutes leurs connaissances. C'est grâce à vous si j'en suis ici aujourd'hui.

De façon plus personnelle, je tiens à remercier évidemment l'ensemble de mes proches de m'avoir soutenu durant ces trois années qui furent parfois difficiles sur le plan personnel. Je vous remercie d'avoir toujours été présent pour moi. Merci à mes parents pour le soutien sans faille dont vous faites preuve, merci de me permettre de faire des études loin de chez moi.

Finalement, un grand merci à toutes les personnes qui ont rendu ce stage possible et que je n'ai pas pu citer précédemment. Votre travail, bien que souvent réalisé dans l'ombre, a été essentiel, qu'il s'agisse de la rédaction des conventions, de la gestion administrative ou de tout autre soutien logistique indispensable au bon déroulement de ce stage. Merci beaucoup.

Abréviations

CONTR	Contrôle expérimental
COMP	Crème solaire complète
FUVo	Filtres UV organiques
FUVm	Filtres UV minéraux
MATR	Matrice de crème solaire
IL	Indice de latéralisation
UV	Ultraviolets

Avant-Propos

Mon stage a été réalisé au sein du laboratoire LIENSs (LIttoral, ENvironnement et Sociétés), une unité mixte de recherche (UMR 7266) sous la tutelle de La Rochelle Université et du CNRS. Le LIENSs est un laboratoire interdisciplinaire spécialisé dans l'analyse des milieux littoraux, combinant sciences biologiques, sciences humaines, mais également chimie et biotechnologie. Il regroupe près de 130 personnes, incluant des chercheurs, des ingénieurs, des techniciens ainsi que des doctorants. Toutes ces personnes sont associées à différentes équipes (AGILE, AMARE, BCBS, BIOFFEL, DPL et ESTRAN) en fonction de leurs spécialités et de leurs thématiques de recherche. Les travaux de recherche qui y sont menés portent entre autres sur la dynamique des écosystèmes côtiers, la biodiversité, les effets de la pollution en mer, les changements littoraux et les relations entre les sociétés humaines et leur environnement.

Dans le cadre de ma troisième année de licence, j'ai rejoint l'équipe AMARE (réponse des Animaux MARins à la variabilité Environnementale) pour y effectuer mon stage sous la responsabilité de Christel Lefrançois et de Benjamin Bellier. Cette équipe est spécialisée dans l'étude des réponses des animaux marins face aux défis environnementaux, que ce soit en raison de causes environnementales (changements de température, salinité, hypoxie) ou anthropiques (pollution chimique et/ou sonore). Le stage que j'ai effectué entre le 14 avril 2025 et le 28 mai 2025 s'inscrit dans ces thématiques en étudiant, dans le cadre du projet Filtres UV financé par l'ANSES dont l'objectif est d'étudier les effets des filtres UV contenus dans les crèmes solaires sur le comportement de la seiche commune (*Sepia officinalis*), les effets des filtres UV contenus dans les crèmes solaires sur le comportement de la seiche commune (*Sepia Officinalis*). L'objectif de ce stage était d'analyser les données issues de tests de latéralisation (capacité à privilégier un œil pour certains comportements) et de camouflage (capacité à adapter leur apparence pour se fondre dans l'environnement) issus d'expérimentations ayant été effectuées en amont de mon stage entre mai 2024 et juillet 2024. Ces tests ont généré une grande quantité de photos, que j'ai analysées afin d'obtenir des données exploitables et quantifiables me permettant de réaliser des statistiques et des tests adaptés. Bien que mon stage soit basé uniquement sur l'analyse des données récoltées en 2024, mon rapport de stage présentera l'ensemble de l'expérimentation dans le but de la rendre accessible.

Durant mon stage, j'ai également eu l'occasion d'observer des seiches (œufs et juvéniles) dans le cadre d'une expérimentation dirigée par Thomas Lacoue-Labarthe (en cours de lancement). J'ai également participé à un autre projet de l'équipe AMARE, le projet ECHO visant à évaluer les effets acoustiques de l'éolien en mer chez les poissons et les mammifères marins. J'ai participé, par exemple, à la fabrication et à la mise en place des antennes de télémétrie RFID permettant d'étudier la distribution des poissons soumis à des conditions avec ou sans son éolien. En complément, j'ai pu participer à une formation d'initiation sur l'outil de prise de notes Obsidian permettant de centraliser et de faciliter son espace de travail au sein d'un quelconque projet.

Sommaire

1. Introduction	6
2. Matériels et méthodes	8
2.1 Etablissement des conditions / crème solaire	8
2.2 Matériel biologique et exposition expérimentale	8
2.3 Mortalité et croissance	9
2.5 Comportement	9
2.5.1. Latéralisation	9
2.5.2 Camouflage	10
3. Analyses statistiques	10
3. Résultats	11
3.1 Mortalité et effets sur la croissance	11
3.3 Effets sur le comportement	12
3.3.1 Effets sur la latéralisation	12
3.3.2 Effets sur le camouflage disruptif	13
4. Discussion	14
5. Références Bibliographiques	16

1. Introduction

Les crèmes solaires sont des produits de soins personnels visant à protéger la peau contre les brûlures causées par le soleil. Elles sont composées d'un ensemble de produits chimiques dont les principes actifs sont les filtres ultraviolets (UV). Leur fonction est de réfléchir, de réfracter et de dissiper certaines longueurs d'onde de la lumière solaire (Caloni et al., 2021), les UVA (315-400 nm) et les UVB (280-315 nm). Dans les crèmes solaires, les filtres UV peuvent être présents sous deux formes : les filtres organiques (par exemple, l'acide phénylbenzimidazole sulfonique ou l'octocrylène) et les filtres minéraux (par exemple, l'oxyde de zinc ou le dioxyde de titane). Bien que leur fonction soit la même, leur mode d'action diffère. En effet, les filtres UV organiques absorbent les rayons UV via des réactions chimiques, alors que les filtres minéraux se contentent de réfléchir et/ou de diffuser les rayons UV via des phénomènes physiques (Yuan et al., 2022).

L'essor du tourisme et les campagnes de prévention contre le cancer de la peau ont entraîné une forte hausse de l'utilisation des crèmes solaires, notamment dans les régions littorales à fort attrait touristique (Buller et al., 2017). Parmi ces pays, la France fait partie des plus visités avec près de 100 millions de visiteurs en 2024 selon le ministère chargé du tourisme. En 2020, pour une plage d'environ 3000 baigneurs, on estimait que la consommation de crème solaire était de 57 kilogrammes par jour, dont près de 15,7 kilogrammes de filtres UV (Labille et al., 2020). Par conséquent, dans plusieurs régions du monde, des concentrations importantes en filtres UV et autres composés chimiques constituant les crèmes solaires (solvants, hydratants, stabilisateurs, etc.) ont été observées dans l'eau de mer, notamment durant la période estivale (Kim et al., 2017 ; Thallinger et al., 2023). Cette nouvelle pollution n'est prise au sérieux que depuis quelques années, bien qu'elle soit identifiée depuis longtemps par la communauté scientifique. Certains des composés formant les crèmes solaires, dont les filtres UV, font partie des polluants émergents qui suscitent une attention croissante en raison de leur impact potentiel sur les écosystèmes (Tovar-Sánchez et al., 2013). En plus de se retrouver dans l'environnement, ces produits peuvent aussi impacter les êtres vivants. Une évaluation effectuée par l'Environmental Working Group a en effet indiqué en 2018 que les deux tiers des produits solaires disponibles dans le commerce contenaient des produits chimiques jugés nocifs pour l'écosystème et les espèces qui le composent (Yuan et al., 2022).

Les filtres UV, qu'ils soient organiques ou minéraux, peuvent affecter différentes fonctions biologiques et avoir des effets sublétaux (cellulaires, enzymatiques, développementaux, reproductifs, comportementaux, ...) ou létaux pour une multitude d'organismes vivants. Ces effets ont été observés notamment chez les mammifères marins, les tortues marines, les poissons, les coraux, les mollusques, les crustacés, les algues ou encore les bactéries (Bordalo et al., 2022 ; Caloni et al., 2021 ; Danovaro et al., 2008 ; Grimmelpont et al., 2023 ; Cocci et al., 2020 ; Carve et al., 2021 ; Hodge et al., 2025). Les effets des filtres UV sur ces organismes varient selon l'intensité de la contamination du milieu en filtres UV et selon les espèces (He et al., 2019). Par exemple, les niveaux trophiques supérieurs sont plus contaminés en filtres UV en raison de la forte bioaccumulation observée chez ces êtres vivants (Cocci et al., 2020 ; Yuan et al., 2022). On remarque que, dans la littérature, la plupart des tests réalisés utilisent des concentrations importantes afin de déterminer des valeurs de référence (EC50, NOEC, ...) pour ces filtres UV. À notre connaissance, peu d'études visent à étudier le risque toxique des mélanges de produits chimiques issus des crèmes solaires, dont les filtres UV, sur des espèces pertinentes d'un point de vue environnemental tout en utilisant des concentrations observables en milieu naturel.

A notre connaissance, la seiche commune (*Sepia officinalis*) a peu été étudiée dans ce contexte de contamination des milieux côtiers par les crèmes solaires. Pourtant, dans le bassin méditerranéen et le long des côtes atlantiques, cette espèce d'importance écologique et commerciale est particulièrement soumise à cette pollution, notamment en période pré-estivale. En effet, cette période correspond à la saison de reproduction qui a lieu à proximité des côtes (février-juillet). Dans ces milieux, la seiche commune est impliquée dans divers réseaux trophiques, en tant que prédateur mais aussi en tant que proie. Cette espèce a donc développé différentes stratégies pour répondre à la prédation. Parmi ces stratégies, le camouflage et la latéralisation sont deux comportements qui confèrent un avantage évolutif à cette espèce. Le camouflage permet à la seiche de se dissimuler dans son environnement et peut prendre différentes formes (Kelman et al., 2007): disruptif (perturbe l'image en cassant la silhouette), molletonné (motifs permettant de se fondre un environnement texturé comme le sable) ou uniforme (couleur homogène sur toute la surface) selon le milieu dans lequel la seiche se trouve (Barbosa et al., 2008 ; Mäthger et al., 2007 ; Minet.A.,2022). De plus, la seiche est latéralisée, ce qui lui donne la capacité de privilégier un côté plutôt qu'un autre dans le cadre d'une réponse comportementale spécifique. L'œil gauche est en général utilisé pour un comportement de vigilance, alors que l'œil droit est majoritairement utilisé pour la prédation (Schnell et al., 2016 ; Jozet-Alves et al., 2012a). Ces capacités permettent globalement une meilleure survie de l'espèce (Dadda & Bisazza, 2006). Cette espèce est toutefois susceptible d'être exposées à de nombreux polluants chimiques tels que ceux présents dans les crèmes solaires en raison de sa répartition sur des littoraux très fréquentés pour leurs activités touristiques.

Cette étude propose donc d'étudier le développement, le comportement et la survie chez des juvéniles de seiches communes (*Sepia officinalis*) exposées à des produits chimiques présents dans les crèmes solaires. Les seiches juvéniles ont été d'abord soumises à différentes conditions d'exposition, caractérisées par des concentrations environnementalement pertinentes et par différents composés spécifiques aux crèmes solaires : (a) crème solaire complète constituée d'une matrice (définissant les propriétés du produit solaire comme sa texture, sa fragrance, ...), de filtres UV organiques et de filtres UV minéraux, (b) crème solaire constituée de la matrice sans aucun filtres UV, (c) crème solaire constituée d'une matrice et de filtres UV organiques et (d) crème solaire constituée d'une matrice et de filtres UV minéraux. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les effets de ces composés lorsqu'ils sont seuls ou combinés. Les conséquences de ces traitements ont été étudiées grâce au suivi de la survie et du développement (poids et taille), ainsi qu'à des suivis comportementaux (camouflage et latéralisation) par analyse d'images.

2. Matériels et méthodes

2.1 Etablissement des conditions / crème solaire

La crème solaire utilisée a été élaborée par le laboratoire CEREGE à Marseille dans le cadre de la thèse de Delphine Thallinger. Cette formulation a été produite de façon à reproduire des concentrations environnementales quantifiées à Palavas-les-Flots dans l'étude de Thallinger et al. (2023). La concentration de 9.6 µg/L d'octocrylène a été choisie comme référence pour créer, *in fine*, les différentes conditions expérimentales (tableau 1) : crème solaire complète (COMP), matrice de cette crème solaire (MATR), matrice contenant uniquement les filtres UV organiques (FUVo), matrice contenant uniquement les filtres UV minéraux (FUVm). Un traitement contrôle (CONTR) subissant les mêmes étapes du protocole décrit ci-après mais sans aucune exposition à aucun de ces composés a été utilisé comme référence pour comparer chaque condition expérimentale. Pour chaque condition, un filtrat est donc préparé à partir d'une crème spécifique (COMP, FUVo, FUVm, MATR). Une dilution de 0,3g de crème a été effectuée dans 250 ml d'eau et la solution a ensuite été filtrée pour retirer les particules (Fig.1). Chacune de ces solutions a finalement été injectée dans l'aquarium d'exposition correspondant à raison de 1 mL quotidiennement afin de procéder à l'exposition des individus. Toutes les solutions ont été préparées en prenant des précautions pour limiter la dégradation des composés chimiques.

Table 1 : Résumé de la composition chimique de chacune des conditions expérimentales.

Composés chimiques	COMP	MATR	FUVo	FUVm	CONTR
Avobenzone	X		X		
Ensulizole	X		X		
Octocrylène	X		X		
Octisalate	X		X		
Octinoxate bemotrizinol	X		X		
Octyl tiazone	X		X		
Dioxyde de titane	X			X	
Dioxyde de zinc	X			X	
Autres composés*	X	X	X	X	

*solvant, hydratant, agent chélateur, stabilisant, épaississant, ajusteur de PH, polymère, émulsifiant, émollient, lubrifiant, antioxydant, antimicrobien, conservateur

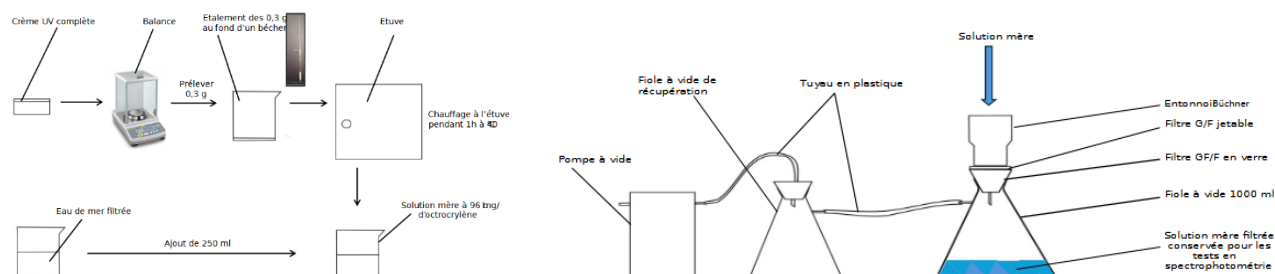


Figure 1 : Résumé du protocole de production des conditions expérimentales.

2.2 Matériel biologique et exposition expérimentale

Les œufs de seiche ont donc été collectés à la plage du Roux les 5 et 6 juin 2024. Puis, ils ont été placés en aquarium oxygéné, où l'eau a été renouvelée quotidiennement.

L'expérimentation a été réalisée avec deux réplicats (nommés I et II dans ce rapport). Une fois les œufs éclos (correspondant au jour 0), 18 seiches juvéniles ont été placées dans des aquariums de 5L le 14 juin 2024 pour le premier réplicat (I) et le 18 juin 2024 pour le second (II). Chaque aquarium est contaminé à l'aide d'1 mL de filtrat de chaque condition présentée dans le tableau 1. L'exposition a duré 28 jours pour les deux réplicats et a donc pris fin le 12 juillet pour le réplicat (I) et le 16 juillet pour le réplicat (II). Durant la phase d'exposition, 20 % de l'eau a été renouvelée quotidiennement puis à partir du 28 juin 2024, l'eau a été renouvelée entièrement chaque jour. Durant l'expérimentation, les seiches ont été soumises à des mesures biométriques et des tests comportementaux (voir ci-dessous). Le 22 juillet, les seiches ont été euthanasiées (à 38 jours post-éclosion pour le réplicat I et 34 jours post-éclosion pour le réplicat II) et congelées dans l'attente de futures analyses histologiques (en cours et qui ne seront pas présentées dans le rapport).

2.3 Mortalité et croissance

La mortalité des seiches a été suivie quotidiennement et a permis par la suite de déterminer des pourcentages de mortalité par condition. La croissance a été suivie via des mesures biométriques (taille du manteau et poids) et une moyenne a été calculée pour l'ensemble des conditions à chaque biométrie réalisée. Ces mesures ont été réalisées à <10 jours et >25 jours de développement. Étant donné que les seiches de quelques jours sont très fragiles et légères, le poids des individus a d'abord été mesuré par groupe de 5 à <10 jours et individuellement à >25 jours à l'aide d'une balance de précision. La taille du manteau a quant à elle été mesurée à partir de photos (3 photos par condition et réplicat) prises sur papier millimétré permettant d'avoir une référence métrique sur les photos. Le logiciel libre uPhotoMeasure 3.4 (<https://uphotomeasure.software.informer.com/3.4/>) a été utilisé pour réaliser les mesures.

2.5 Comportement

Les analyses comportementales de camouflage ont été réalisées en fin d'expérimentation, à 26 et 31 jours post-éclosion pour le réplicat I et à 28 et 29 jours post-éclosion pour le réplicat II. Les analyses comportementales de latéralisation ont été réalisées à 27 jours post-éclosion pour le réplicat I et 30 jours post-éclosion pour le réplicat II. Ainsi, en raison d'une forte mortalité des individus, les conditions peuvent être peu représentées et écartées de l'analyse statistique.

2.5.1. Latéralisation

Afin de mesurer les effets des différentes expositions sur la latéralisation, un indice de latéralisation a été calculé. Pour ce faire, des seiches ont été placées individuellement dans des arènes en PVC gris de 6,5 cm de diamètre permettant aux seiches d'adopter un certain comportement de vigilance, censé être attribué à l'œil gauche. Une série de photos a ensuite été prise pour chaque seiche (11 à 13 photos par individu) à intervalles de 5 minutes pendant une heure après 15 minutes d'acclimatation. Ensuite, pour chaque photo, une note de -1, 0 ou +1 a été attribuée selon l'expression de la latéralisation (Bisazza et al., 2000) comme décrit sur la figure 2. Ensuite, un indice de latéralité (IL) a été calculé pour chaque individu comme suit :

$$\text{Indice de latéralité (IL)} = \frac{nD - nG}{nTot}$$

Où nD représente le nombre de fois où l'œil droit est l'œil de vigilance et nG représente le

nombre de fois où l'œil gauche est l'œil de vigilance. Les indices sont ensuite moyennés par conditions.

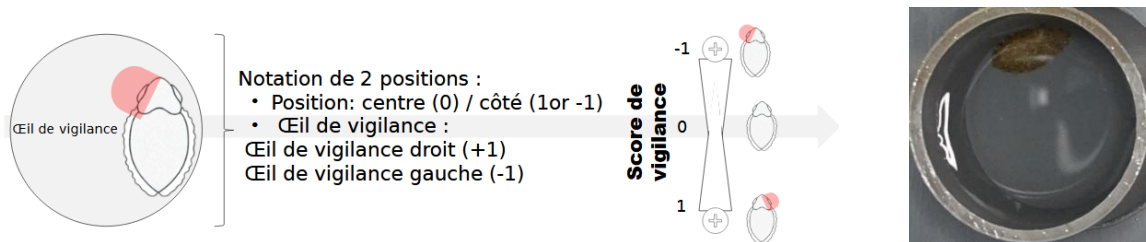


Figure 2 : Principe de la mesure du score de vigilance chez les seiches. La photo montre une seiche utilisant son œil droit, une valeur de 1 lui est donc attribuée.

2.5.2 Camouflage

Afin de mesurer les effets des différentes expositions sur le camouflage, des analyses de score de camouflage disruptif ont été réalisées. Des seiches ont été placées individuellement dans des arènes à fond et aux parois quadrillées sous la forme de damiers blanc et noir de côté de 0,5 cm. Ce dispositif permettait aux seiches d'être suffisamment « stressées » pour adopter un certain patronne de camouflage disruptif. Des photos ont ensuite été prises (4 par individu, prises toutes les 5 minutes après 15 minutes d'acclimatation) et ont servi à attribuer une note de 0 à 3 selon l'expression du camouflage pour chacune des 11 zones caractéristiques (zone numérotée de 1 à 29, voir les zones sur la Fig. 3) (Hanlon & Messenger, 1988). Certaines de ces zones sont exprimées lorsqu'elles sont foncées (17, 18, 19, 21, 22 et 29) et les autres lorsqu'elles sont claires (1, 2, 3, 13 et 14). La note maximale d'expression représentant un camouflage total très exprimé est donc de 33. Afin de limiter le biais de l'observateur, une comparaison de notation a été réalisée en amont avec un expert de la méthode (Antoine Minet, Oak Ridge National Laboratory).

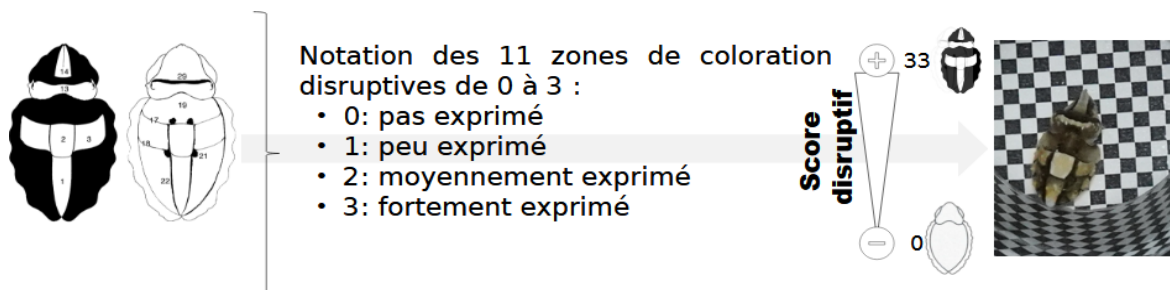


Figure 3 : Principe de la mesure du score de camouflage disruptif chez les seiches. Les 11 zones analysées sont identifiées sur les schémas à gauche. Par exemple, la photo à droite correspond à une note de 25/33.

3. Analyses statistiques

Les analyses de données et statistiques ont été réalisées sur le logiciel RStudio (version 4.4.1). Le test ANOVA a été utilisé pour étudier les différences entre les moyennes des conditions d'expérimentation (CONTR, MATR, FUVo, FUVm et COMP). La normalité et l'homogénéité des résidus ont été vérifiées statistiquement (test de Shapiro et test de Levene, respectivement) et graphiquement. Si ces conditions n'étaient pas respectées, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé. Ensuite, un test post hoc de Tukey ou une de ses alternatives non paramétriques (test post hoc de Dunn avec correction de Bonferroni) a été utilisé pour identifier les différences entre conditions d'expérimentations. Le seuil de significativité a été fixé à 5 %.

3. Résultats

3.1 Mortalité et effets sur la croissance

Les analyses statistiques ont montré un effet significatif des conditions d'exposition sur la mortalité des seiches après 28 jours (ANOVA, p -value $< 0,05$, Fig. 4A). En effet, la mortalité était significativement plus importante pour la condition COMP par rapport à la condition CONTR ainsi que MATR et FUVm (Tukey, p -value $< 0,05$). Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre la condition COMP et FUVo (Tukey, p -value $> 0,05$).

Les figures 4B et 4C mettent en évidence la croissance (poids pour 4B et taille pour 4C) des seiches en fonction des différentes conditions expérimentales. Aucune différence significative n'a été observée pour les deux variables à < 10 jours et à > 25 jours post-éclosion.

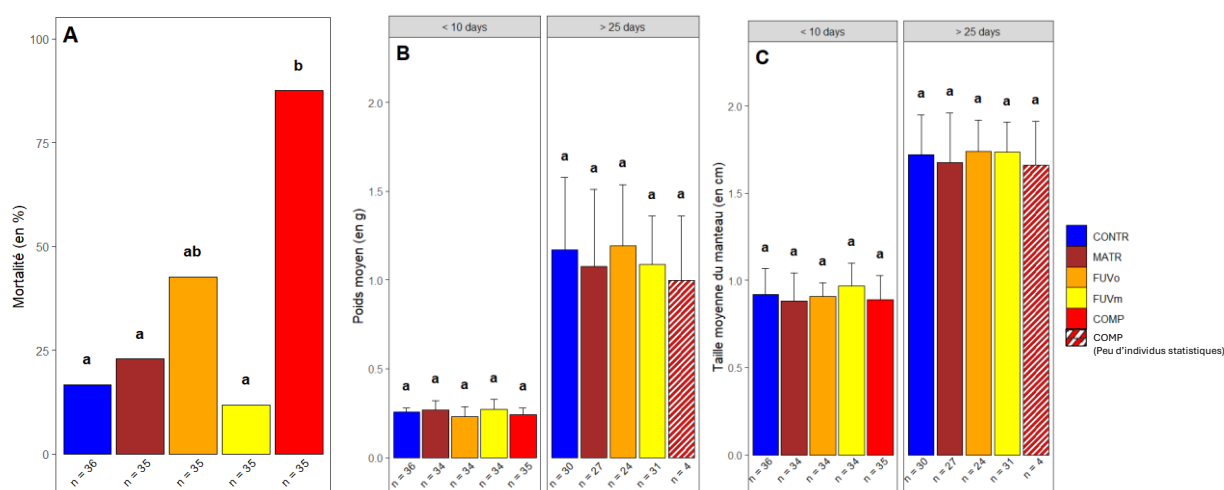


Figure 4 : (A) Mortalité des seiches après 28 jours en fonction de la condition d'exposition. (B) Poids moyen et (C) taille moyenne du manteau des seiches juvéniles selon les différentes conditions d'exposition et leur stade de développement (< 10 jours et > 25 jours). Pour la condition COMP, les mesures de croissance > 25 jours sont hachurées car elles ne sont pas assez nombreuses pour être considérées au niveau statistique.

3.3 Effets sur le comportement

3.3.1 Effets sur la latéralisation

Les figures 5 et 6, permettent de mettre en évidence les moyennes de l'indice de latéralité selon les cinq conditions d'expositions. Aucun effet significatif des conditions expérimentales sur l'indice de latéralisation IL n'a été démontré (Kruskal-Wallis, p -value $> 0,05$).

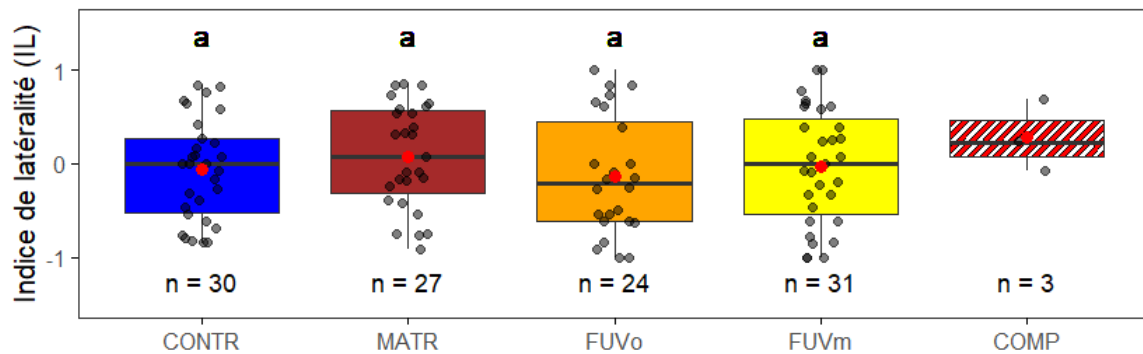


Figure 5 : Indice de latéralisation (IL) en fonction des conditions d'exposition. Les réplicats sont confondus. Les points noirs représentent les individus, les points rouges représentent la moyenne de l'indice de latéralisation IL pour chaque condition. Le boxplot représente l'intervalle interquartile et la barre noire la médiane. La condition COMP n'a pas été prise en compte dans les tests statistiques en raison de son effectif trop faible. Les lettres différentes représentent des différences significatives entre chaque condition ($p < 0,05$).

3.3.2 Effets sur le camouflage disruptif

Les analyses statistiques ont montré un effet significatif des conditions d'exposition sur l'expression du camouflage (Kruskal-Wallis, $p\text{-value} < 0,001$). En effet, l'expression du camouflage était significativement plus faible pour MATR et FUVo par rapport à la condition CONTR et FUVm (Dunn, $p\text{-value} < 0,05$). Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre la condition CONTR et FUVm (Dunn, $p\text{-value} > 0,05$). De la même manière aucune différence significative n'a été observée entre la condition MATR et FUVo (Dunn, $p\text{-value} > 0,05$). La condition COMP a quant à elle été écartée des tests statistiques car peu de données étaient disponibles. Cependant, le niveau d'expression des individus exposés à la condition COMP est comparable à celui des individus exposés à la condition FUVo et MATR.

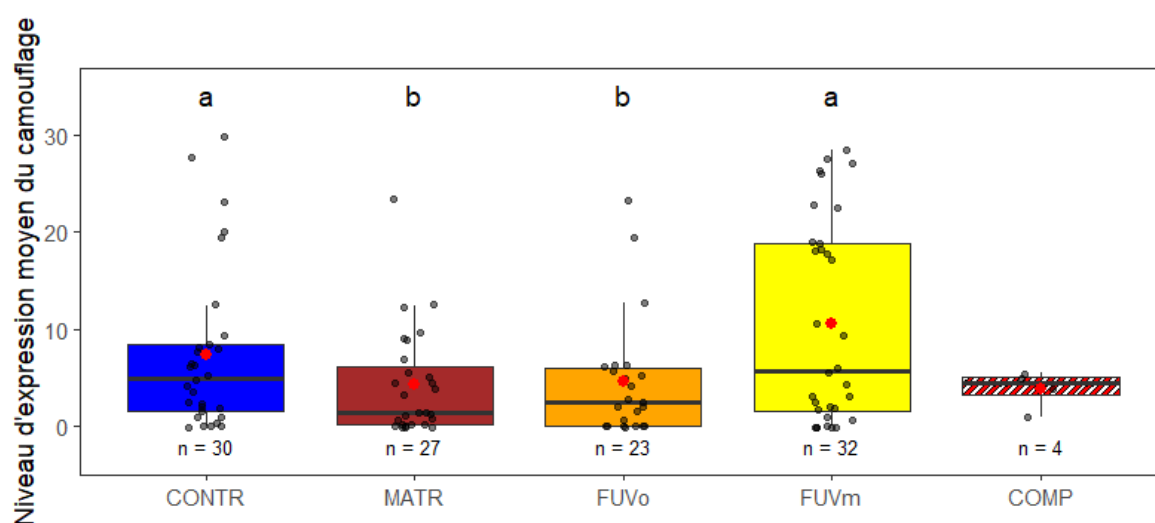


Figure 6 : Niveau d'expression moyen du camouflage des seiches en fonction de la condition d'exposition. Les réplicats sont confondus. Les points noirs représentent les individus, les points rouges représentent la moyenne de l'expression du camouflage pour chaque condition. Le boxplot représente l'intervalle interquartile et la barre noire la médiane. La condition COMP n'a pas été prise en compte dans les tests statistiques en raison de son effectif trop faible. Les lettres différentes représentent des différences significatives entre chaque condition ($p < 0,05$).

4. Discussion

L'utilisation massive des crèmes solaires dans les zones littorales peut conduire à des concentrations anormales et potentiellement nocives dans le milieu marin. Nos résultats permettent de mettre en lumière certains effets de ces produits sur la seiche *commune Sepia officinalis*. Tout d'abord, une mortalité plus importante a été observée dans la condition COMP (crème solaire composée d'une matrice de filtres UV organiques et minéraux). Cette forte mortalité en condition COMP nous a donc empêché d'interpréter statistiquement les autres tests réalisés (croissance et comportement) pour cette condition. Le camouflage disruptif s'est quant à lui révélé être moins efficace pour les seiches exposées aux conditions MATR (crème solaire constituée d'une matrice sans filtres UV) et FUVo (crème solaire constituée de matrice et de filtres UV organiques). Par ailleurs, la condition d'exposition FUVm (crème solaire constituée de matrice et de filtres UV minéraux) n'a montré aucun effet significatif sur le comportement de camouflage des seiches. De plus, aucun effet significatif des différentes conditions d'expositions n'a été observé pour la croissance et le comportement de latéralisation.

Nos résultats suggèrent donc que le mélange chimique formant les crèmes solaires (matrice et filtres UV, voir Tableau 1) peut avoir des effets létaux et sublétaux (notamment pour le camouflage disruptif) chez *Sepia officinalis*. En réalisant les mêmes expérimentations sur des poissons clowns (*Amphiprion ocellaris*), exposés aux mêmes conditions expérimentales que notre étude, Thallinger, (2025) a également observé une mortalité accrue des individus dans la condition crème solaire complète (COMP). Ces effets létaux observés uniquement dans cette condition pourraient s'expliquer par un effet synergique des composants chimiques présents dans la crème solaire complète. Les mélanges de composants chimiques peuvent, en effet, s'amplifier ou se réduire lorsqu'ils sont combinés (Backhaus et al., 2012). Cependant, les études divergent sur les effets de combinaisons des composés de crèmes solaires. Certains mettent en évidence des effets antagonistes entre les composés (Kudlak et al., 2022), tandis que d'autres soulignent des effets synergiques (Soler de la Vega et al., 2019). Des études supplémentaires prenant en compte l'ensemble des composés présents dans les crèmes solaires sont donc nécessaires afin de mieux comprendre les effets possibles de ces mélanges. Le camouflage disruptif a également été impacté par l'exposition aux conditions MATR et FUVo. En effet, dans ces conditions, la capacité de camouflage disruptif des seiches a été réduite. Le camouflage disruptif des seiches repose sur les chromatophores, des cellules spécialisées contrôlées par le système nerveux central (Reiter et al., 2018). Certains composés chimiques présents dans les conditions MATR et FUVo pourraient perturber le fonctionnement du système nerveux central et seraient responsables des effets sublétaux observés dans notre étude. Blüthgen et al., (2014) ont démontré que certains filtres UV organiques sont neurotoxiques pour l'espèce *Danio rerio*, modifiant l'expression des gènes et causent des perturbations comportementales. Pour la condition MATR, il est difficile d'identifier avec précision quelles substances pourraient altérer le camouflage disruptif, car elle est composée d'une grande variété de produits chimiques de natures variées. À notre connaissance, aucune étude n'a étudié avec précision les effets de la matrice de crème solaire en absence de filtres UV. Néanmoins, certains composés de la matrice sont connus pour être potentiellement nocifs. Par exemple, Wang et al., (2015) ont montré un effet des tensioactifs éthoxylés (émulsifiants) sur le comportement du poisson zèbre (*danio rerio*).

Ainsi, certains effets létaux et sublétaux ont été observés, notamment sur le camouflage disruptif des seiches et ont donc montré un effet nocif des crèmes solaires pour cette espèce. Cependant, les autres paramètres étudiés suggèrent que les effets ne sont pas systématiques.

La croissance et le comportement de latéralisation étudiés dans notre étude n'ont pas été affectés par les conditions d'expositions (MATR, FUVo, FUVm, COMP). L'absence d'effets pour ces tests peut s'expliquer par une concentration en produits chimiques dans les aquariums trop faible. En effet, Sanches et al. (2021) ont démontré un effet de l'octocrylène sur la croissance pour 50 % des individus de polychètes *Ficopomatus enigmaticus* lorsqu'ils étaient exposés à une concentration de 14,74 mg/L, une valeur largement supérieure à celle de nos expérimentations (9,6 µg/L soit 0,0096 mg/L). De plus, les mécanismes de latéralisation reposent sur l'asymétrie cérébrale et sont donc déterminés durant la phase de développement embryonnaire (Jozet-Alves et al., 2012b). Dans notre étude, les contaminations ayant débuté après l'éclosion des œufs, les seiches ont donc eu un développement embryonnaire normal. Il serait donc intéressant d'étudier les effets d'une contamination des œufs aux différentes conditions d'expositions afin de déterminer si le développement embryonnaire et la latéralisation seraient impactés. De plus, pour l'ensemble des expérimentations, la condition FUVm ne s'est pas révélée nocive pour les seiches communes. Cela pourrait s'expliquer par le mode de fonctionnement des filtres minéraux. En effet, ceux-ci seraient moins nocifs pour l'environnement grâce à leur résistance structurelle et seraient également peu absorbés par les organismes marins par rapport aux filtres UV organiques (Martin et al., 2022).

En plus d'une augmentation de la mortalité, les modifications du comportement de camouflage disruptif ont des effets évidents sur la survie des seiches dans leurs environnements naturels. En effet, le camouflage est une des fonctions de défense principale de cette espèce, lui permettant à la fois de ne pas être vu par ses prédateurs, mais également de chasser sans être vu. Cette altération du camouflage, pourrait, à long terme, entraîner des conséquences sur l'ensemble de l'écosystème, en perturbant les réseaux trophiques et en dérégulant les interactions au sein de celui-ci. De plus, la seiche commune est une espèce ayant un fort intérêt économique sur les littoraux, et l'appauvrissement de ses stocks pourrait nuire socio-économiquement aux communautés locales, et notamment aux professionnels exploitant cette espèce.

Pour conclure, l'exposition aux crèmes solaires peut entraîner une mortalité plus importante et affecter certaines fonctions essentielles telles que le camouflage disruptif chez la seiche commune (*Sepia officinalis*). Les analyses histologiques prévues permettront une meilleure compréhension des effets des différentes conditions d'expositions, particulièrement pour de potentiels effets qui n'ont pas pu être observés ici. La composition complexe des crèmes solaires (matrice et filtres UV) et le peu de données disponibles sur les conséquences de ces produits rendent difficile l'analyse des effets, en particulier pour des concentrations pertinentes trouvables dans l'environnement. Néanmoins, certains composés chimiques présents dans les crèmes solaires comme l'octocrylène, un filtre UV organique, ont déjà été proscrits dans certains pays (Narla & Lim., 2020) et pourraient bientôt le devenir dans d'autres pays. Il est également indispensable de mener des recherches supplémentaires sur d'autres phases de vie de la seiche et sur diverses espèces afin d'évaluer plus précisément les risques écologiques et socio-économiques engendrés par l'utilisation massive de crème solaire dans les environnements aquatiques.

5. Références Bibliographiques

Barbosa, A., Litman, L., & Hanlon, R. T. (2008). Changeable cuttlefish camouflage is influenced by horizontal and vertical aspects of the visual background. *Journal of Comparative Physiology A*, 194(6), 577–585. doi:10.1007/s00359-007-0311-1

Bisazza, A., Cantalupo, C., Capocchiano, M., & Vallortigara, G. (2000). Population lateralization and social behaviour: A study with 16 species of fish. *Laterality*, 5, 269–284. doi:10.1080/713754381

Backhaus, T., & Faust, M. (2012). A conceptual framework for the environmental risk assessment of chemical mixtures. *Environmental Science & Technology*, 46(5), 2564–2573. doi:10.1021/es2034125

Blüthgen, N., Meili, N., Chew, G., Odermatt, A., & Fent, K. (2014). Accumulation and effects of the UV-filter octocrylene in adult and embryonic zebrafish (*Danio rerio*). *Science of the Total Environment*, 476–477, 207–217. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.01.015

Bordalo, D., Cuccaro, A., De Marchi, L., Soares, A. M. V. M., Meucci, V., Battaglia, F., Pretti, C., & Freitas, R. (2022). In vitro spermiotoxicity and in vivo adults' biochemical pattern after exposure of the Mediterranean mussel to the sunscreen avobenzone. *Environmental Pollution*, 314, 119987. doi:10.1016/j.envpol.2022.119987

Buller, D. B., Andersen, P. A., Walkosz, B. J., Scott, M. D., Beck, L., Cutter, G. R., ... & Maloy, J. A. (2017). Effect of an intervention on observed sun protection by vacationers in outdoor recreation settings at warm-weather resorts. *Journal of the National Cancer Institute*, 109(12), djx016. doi:10.1093/jnci/djx016

Cahova, J., Blahova, J., Plhalova, L., Svobodova, Z., & Faggio, C. (2021). Do single-component and mixtures of selected organic UV filters induce embryotoxic effects in zebrafish (*Danio rerio*)? *Water*, 13(16), 2203. doi:10.3390/w13162203

Caloni, S., Durazzano, T., Franci, G., & Marsili, L. (2021). Sunscreens' UV filters risk for coastal marine environment biodiversity: A review. *Diversity*, 13(7), 374. doi:10.3390/d13070374

Carve, M., Nuggeoda, D., Allinson, G., & Shimeta, J. (2021). A systematic review and ecological risk assessment for organic ultraviolet filters in aquatic environments. *Environmental Pollution*, 268, 115894. doi:10.1016/j.envpol.2020.115894

Dadda, M., & Bisazza, A. (2006). Does brain asymmetry allow efficient performance of simultaneous tasks? *Animal Behaviour*, 72(3), 523–529. doi:10.1016/j.anbehav.2005.10.019

Danovaro, R., Bongiorno, L., Corinaldesi, C., Giovannelli, D., Damiani, E., Astolfi, P., Greci, L., & Pusceddu, A. (2008). Sunscreens cause coral bleaching by promoting viral infections. *Environmental Health Perspectives*, 116(4), 441–447. doi:10.1289/ehp.10966

- Hanlon, R. T., & Messenger, J. B. (1988). Adaptive coloration in young cuttlefish (*Sepia officinalis* L.): The morphology and development of body patterns and their relation to behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 320(1200), 437–487. doi:10.1098/rstb.1988.0087
- He, T., Tsui, M. M. P., Tan, C. J., Ng, K. Y., Guo, F. W., Wang, L. H., Chen, T. H., Fan, T. Y., Lam, P. K. S., & Murphy, M. B. (2019). Comparative toxicities of four benzophenone ultraviolet filters to two life stages of two coral species. *Science of the Total Environment*, 651, 2391–2399. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.102
- Hodge, A. A., Hopkins, F. E., Saha, M., & Jha, A. N. (2025). Ecotoxicological effects of sunscreen derived organic and inorganic UV filters on marine organisms: A critical review. *Marine Pollution Bulletin*, 213, 117627. doi:10.1016/j.marpolbul.2025.117627
- Jozet-Alves, C., Viblanc, V. A., Romagny, S., Dacher, M., Healy, S. D., & Dickel, L. (2012a). Visual lateralization is task and age dependent in cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Animal Behaviour*, 83, 1313–1318. doi:10.1016/j.anbehav.2012.02.023
- Jozet-Alves, C., Romagny, S., Bellanger, C., & Dickel, L. (2012b). Cerebral correlates of visual lateralization in *Sepia*. *Behavioural Brain Research*, 232(), 125–131. doi:10.1016/j.bbr.2012.03.034
- Kelman, E. J., Baddeley, R. J., Shohet, A. J., & Osorio, D. (2007). Perception of visual texture and the expression of disruptive camouflage by the cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 1369–1375. doi:10.1098/rspb.2007.0240
- Kim, K. Y., Ekpeghere, K. I., Jeong, H.-J., & Oh, J.-E. (2017). Effects of the summer holiday season on UV filter and illicit drug concentrations in the Korean wastewater system and aquatic environment. *Environmental Pollution*, 227, 587–595. doi:10.1016/j.envpol.2017.04.055
- Kudlak, B., Jatkowska, N., Liu, W., Williams, M. J., Barceló, D., & Schiöth, H. B. (2022). Enhanced toxicity of bisphenols together with UV filters in water: Identification of synergy and antagonism in three-component mixtures. *Molecules*, 27(10), 3260. doi:10.3390/molecules27103260
- Labille, J., Slomberg, D., Catalano, R., Robert, S., Apers-Tremelo, M.-L., Boudenne, J.-L., Manasfi, T., & Radakovitch, O. (2019). Assessing UV filter inputs into beach waters during recreational activity: A field study of three French Mediterranean beaches from consumer survey to water analysis. *Science of the Total Environment*, 697, 136010. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136010
- Martin, N., Wassmur, B., Slomberg, D., Labille, J., & Lammel, T. (2022). Influence of TiO₂ nanocomposite UV filter surface chemistry and their interactions with organic UV filters on uptake and toxicity toward cultured fish gill cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 245, 113984. doi:10.1016/j.ecoenv.2022.113984
- Mäthger, L. M., Chiao, C.-C., Barbosa, A., & Hanlon, R. T. (2007). Color matching on natural

substrates in cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Journal of Comparative Physiology A*, 193(6), 577–585.

Minet, A. (2022). Bioaccumulation and effects of mercury in cuttlefish in the context of ocean acidification (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).

Narla, S., & Lim, H. W. (2020). Sunscreen: FDA regulation, and environmental and health impact. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19(1), 66–70. doi:10.1039/C9PP00411G

Reiter, S., Laurent, G., & Srivastava, K. H. (2018). A system for tracking cuttlefish chromatophores reveals principles of dynamic pattern generation. *Nature*, 562(7725), 361–366. doi:10.1038/s41586-018-0616-z

Schnell, A. K., Hanlon, R. T., Benkada, A., & Jozet-Alves, C. (2016). Lateralization of eye use in cuttlefish: Opposite direction for anti-predatory and predatory behaviors. *Frontiers in Physiology*, 7, 620. doi:10.3389/fphys.2016.00620

Soler de la Vega, A. C., Molins-Delgado, D., Barceló, D., & Díaz-Cruz, M. S. (2019). Nanosized titanium dioxide UV filter increases mixture toxicity when combined with parabens. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 186, 109565. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109565

Thallinger, D., Labille, J., Milinkovitch, T., Boudenne, J.-L., Loosli, F., Slomberg, D., Angeletti, B., & Lefrançois, C. (2023). UV filter occurrence in beach water of the Mediterranean coast – A field survey over 2 years in Palavas-les-Flots, France. *International Journal of Cosmetic Science*. doi:10.1111/ics.12904

Thallinger, D. (2025). Émission, devenir et effets environnementaux des filtres UV issus de crèmes solaires – Avantages et risques des substances chimiques ou nanoparticulaires [Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université]. École Doctorale Sciences de l'environnement, CEREGE.

Tovar-Sánchez, A., Sánchez-Quiles, D., Basterretxea, G., Benedé, J. L., Chisvert, A., Salvador, A., Moreno-Garrido, I., & Blasco, J. (2013). Sunscreen products as emerging pollutants to coastal waters. *PLOS ONE*, 8(6), e65451. doi:10.1371/journal.pone.0065451

Wang, Y., Zhang, Y., Li, X., Sun, M., Wei, Z., Wang, Y., Gao, A., Chen, D., Zhao, X., & Feng, X. (2015). Exploring the effects of different types of surfactants on zebrafish embryos and larvae. *Scientific Reports*, 5, 10107. doi:10.1038/srep1010

Yuan, S., Huang, J., Jiang, X., Huang, Y., Zhu, X., & Cai, Z. (2022). Environmental fate and toxicity of sunscreen-derived inorganic ultraviolet filters in aquatic environments: A review. *Nanomaterials*, 12(4), 699. doi:10.3390/nano12040699