



HAL
open science

Revue systématique “ Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux ” : rapport technique

Dakis-Yaoba Ouédraogo

► **To cite this version:**

Dakis-Yaoba Ouédraogo. Revue systématique “ Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux ” : rapport technique. MNHN Paris. 2022, pp.141. hal-04085082

HAL Id: hal-04085082

<https://hal.science/hal-04085082v1>

Submitted on 28 Apr 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Revue systématique
« Effets écotoxicologiques des substances chimiques
sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux » :
rapport technique



2022

Rédaction : Dakis-Yaoba OUEDRAOGO, MNHN (en association avec Salomé ANDRES, PatriNat [OFB-MNHN-CNRS], concernant le chapitre sur les études observationnelles)

Relecture : Romain SORDELLO (PatriNat), Yorick REYJOL (PatriNat), Nirmala Séon-Massin (MNHN), Romuald Berrebi (OFB), Olivier Perceval (OFB)

Contributeurs (par ordre alphabétique) : Sophie BRUGNEAUX (OFB), Karen BURGA (Anses), Christophe CALVAYRAC (Université de Perpignan), Magalie CASTELIN (MNHN), Mathilde DELAUNAY (PatriNat), Isabelle DOMART-COULON (MNHN), Christine FERRIER-PAGES (Centre Scientifique de Monaco), Mireille M.M. GUILLAUME (MNHN), Laetitia HEDOUIN (CRIOBE), Pascale JOANNOT (MNHN), Odile KERKHOF (Anses), Clément LEGER (MNHN), Hugo MELL (PatriNat), Romane MULTON (Anses), Olivier PERCEVAL (OFB), Yorick REYJOL (PatriNat), Romain SORDELLO (PatriNat)

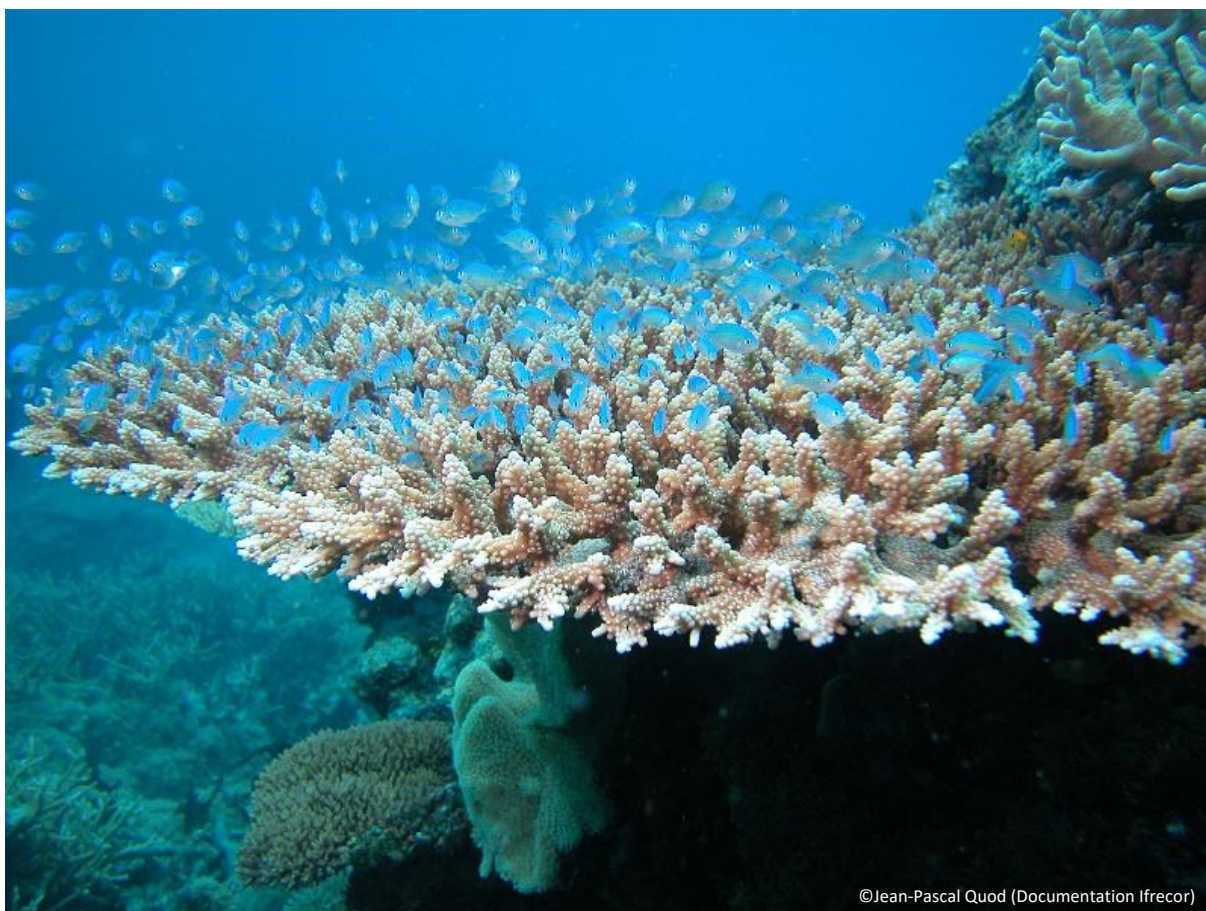
Citation : Ouédraogo D.-Y. (2022) Revue systématique « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux » : rapport technique. MNHN, Paris, 141p.

Table des matières

Résumé.....	7
Chapitre 1 Introduction.....	9
Chapitre 2 Méthodes.....	15
Chapitre 3 Résultats de la carte systématique.....	23
Chapitre 4 Métaux.....	25
Chapitre 5 Pesticides.....	42
Chapitre 6 Hydrocarbures.....	57
Chapitre 7 Filtres ultraviolets.....	74
Chapitre 8 Pharmaceutiques.....	82
Chapitre 9 Microplastiques.....	93
Chapitre 10 Dispersants & Détergents.....	103
Chapitre 11 Nanoparticules & autres substances.....	111
Chapitre 12 Conclusion.....	121
Annexes.....	126
Références.....	138

Résumé

Les récifs coralliens tropicaux abritent une biodiversité exceptionnelle et fournissent d'importants services aux sociétés humaines mais ils sont actuellement fortement menacés par des facteurs de stress globaux et locaux, dont la pollution par les substances chimiques. Afin d'identifier les substances potentiellement à risque pour les coraux, le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) et l'Office Français de la Biodiversité (OFB) ont mené une synthèse bibliographique sur les impacts des substances chimiques issues de l'activité humaine sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux. La méthode des revues systématiques suivant les normes édictées par la *Collaboration for Environmental Evidence* a été utilisée, garantissant ainsi une synthèse fiable et robuste pour la prise de décision. La première étape du travail a consisté à produire une carte systématique (cartographie de la littérature disponible) afin d'identifier les manques (*knowledge gaps*) et les amas (*knowledge clusters*) de connaissance pour lesquels il est pertinent de poursuivre le travail de synthèse en revue systématique. Ensuite, une revue systématique a été réalisée sur les effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux. Cette revue a rassemblé une grande quantité d'information sur le sujet : 655 études issues de 148 documents et couvrant 9 catégories de substances ont été synthétisées. La plupart des substances étudiées ont entraîné un effet statistiquement négatif sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées d'exposition. Combinées à des données d'exposition dans le milieu naturel, ces informations permettront d'identifier les substances les plus à risque pour les coraux. Ce travail permet donc de participer à l'effort collectif de conservation de ces joyaux des mers que sont les récifs coralliens.



Chapitre 1 Introduction

1.1 Contexte

Les récifs coralliens tropicaux ne couvrent qu'environ 0.1 % de la surface de la Terre mais ils abritent une biodiversité exceptionnelle (Hoeksema, 2017) puisqu'on estime que 32 % de toutes les espèces marines nommées se trouvent dans les récifs coralliens (Fisher et al., 2015). Ils fournissent également d'importants services écosystémiques à des millions de personnes vivant à proximité (Burke et al., 2011; Ferrario et al., 2014) et les bénéfices nets en biens et services pour les économies mondiales sont estimés à près de 30 milliards de dollars par an (Cesar et al., 2003). Malgré leur importance biologique et économique, 75% des récifs coralliens tropicaux de la planète sont actuellement menacés par des facteurs de stress globaux et locaux (Barlow et al., 2018; Burke et al., 2011; Ellis et al., 2019). Entre 2009 et 2018, la couverture moyenne mondiale de coraux durs est passée de 33.3 % à 28.8 %, ce qui équivaut approximativement à la perte de tous les coraux durs vivant actuellement sur les récifs coralliens d'Australie (Souter et al., 2021). Alors que les menaces globales les plus importantes sont représentées par le réchauffement et l'acidification de l'eau de mer (Hoegh-Guldberg et al., 2017), les menaces locales sont principalement représentées par le développement non durable ou destructeur des zones côtières, la sédimentation excessive, la surpêche, ainsi que la pollution par les nutriments et les substances chimiques résultant d'une mauvaise gestion des terres, de l'urbanisation, de l'agriculture et de l'industrie (Hoegh-Guldberg et al., 2019; Wilkinson, 2008).

La santé des écosystèmes récifaux repose en grande partie sur la santé de leurs principales espèces ingénieuses, **les coraux constructeurs de récifs**, qui sont des organismes clés formant les structures tridimensionnelles servant d'habitat, de nourriture et de nurserie pour des milliers d'autres organismes récifaux (Cunning et al., 2019). La grande majorité de ces coraux (coraux hermatypiques, *sensu* Schuhmacher and Zibrowius (1985)) sont des coraux scléactiniaires coloniaux (Cnidaria Hexacorallia) vivant en association avec des algues dinoflagellées endosymbiotiques appartenant à la famille des Symbiodiniaceae (LaJeunesse et al., 2018). Les symbiotes sont la principale source nutritionnelle des coraux via la photosynthèse, et la rupture de la symbiose corail-algue, également appelée blanchissement des coraux, peut conduire à terme à la mort des coraux si elle se prolonge, et affecter le fonctionnement global des écosystèmes récifaux coralliens (Cunning et al., 2019). Le principal facteur responsable du blanchissement des coraux est le réchauffement de l'eau de mer (Brown, 1997) mais la symbiose corallienne est également largement impactée dans les récifs côtiers par la pollution de l'eau qui constitue une menace majeure en elle-même (Duprey et al., 2016), exerçant des effets toxiques directs et indirects sur l'animal et l'algue symbiotique. Selon le type de pollution, l'hôte, les symbiotes ou les deux partenaires sont affectés, par une réduction de la calcification, de la photosynthèse ou de la fécondité, et par une augmentation du blanchissement et du stress oxydatif, entre autres dommages (De Barros Marangoni et al., 2017; Prouty et al., 2017; Richmond et al., 2018). La pollution de l'eau réduit également la résistance et la résilience des coraux au stress thermique et à l'acidification (DeCarlo et al., 2015; Donovan et al., 2020; Wooldridge, 2009) et augmente les maladies coralliennes et l'apparition d'agents pathogènes (Zaneveld et al., 2016), entraînant ainsi une forte diminution de la couverture corallienne et des fonctions des récifs (Zaneveld et al. (2016), **Figure 1.1**). Si les facteurs de stress globaux ne peuvent être stoppés par des actions locales, les facteurs de stress locaux peuvent être réduits via des mesures de gestion, ce qui permet d'éviter l'exacerbation des effets du changement climatique par l'interaction de multiples facteurs de stress (MacNeil et al., 2019).

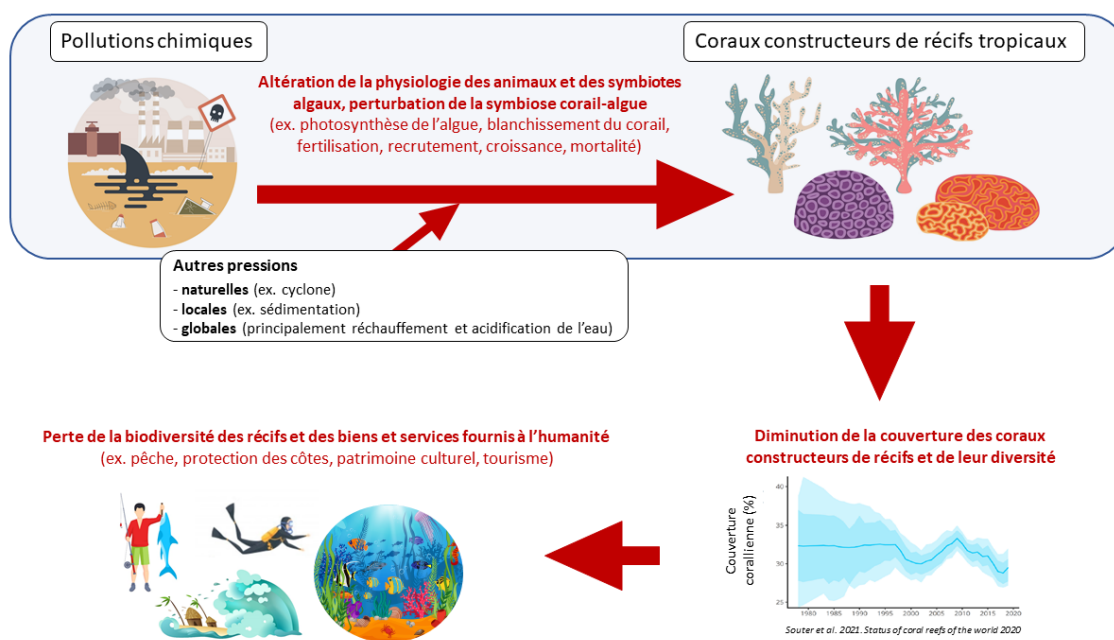


Figure 1.1. Modèle conceptuel illustrant comment les impacts écotoxicologiques de la pollution chimique sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux conduisent en cascade à la perte de la biodiversité des récifs coralliens et des biens et services fournis à l'humanité (Source : Ouédraogo et al. (2021b)).

Les récifs coralliens des **Territoires d'Outre-Mer français (Figure 1.2)** couvrent 14 280 km², soit 5% de la superficie totale des récifs coralliens dans le monde (Joannot, 2010; Sheppard et al., 2018). La France est le pays qui possède la 4^{ème} plus grande surface de récifs coralliens au monde, après l'Indonésie (18% de la surface mondiale), l'Australie (17%) et les Philippines (9%) (Sheppard et al., 2018). Elle a donc une responsabilité importante dans la protection des récifs coralliens. Or la majorité de ces récifs sont dégradés dans les territoires soumis à une forte pression démographique et à une anthropisation croissante (Ifreco, 2020).

Le Ministère de l'écologie a saisi à l'automne 2018 l'Agence Française pour la Biodiversité (aujourd'hui l'Office Français de la Biodiversité, OFB) et l'Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation et de l'environnement et du travail (Anses), relativement aux impacts des substances chimiques sur les récifs coralliens (Annexe A). L'objectif de cette saisine était d'évaluer les impacts des substances chimiques et des nutriments sur les récifs coralliens afin d'améliorer à terme la protection et la gestion des récifs coralliens à l'échelle nationale en proposant des mesures techniques et réglementaires. Afin d'identifier les substances potentiellement à risque pour les coraux, l'OFB et le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) ont mené une revue bibliographique sur le sujet.

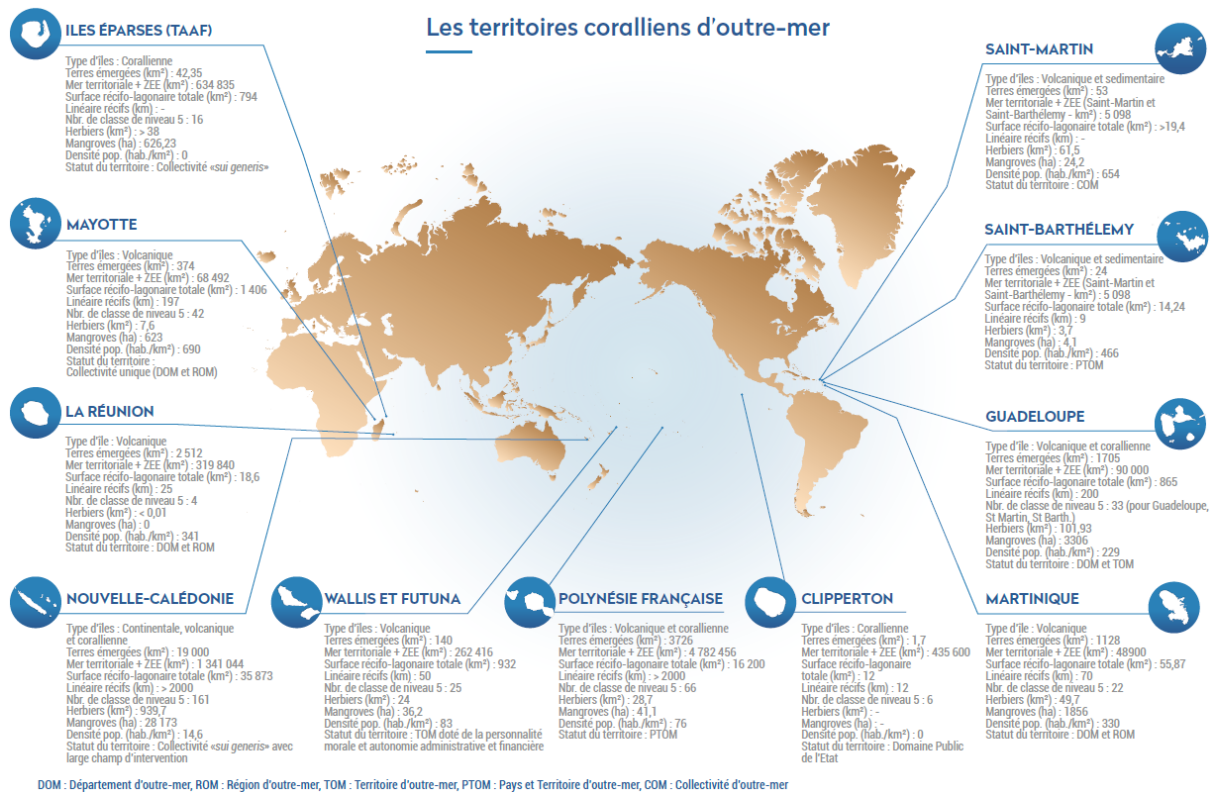


Figure 1.2. Les territoires coralliens d'outre-mer français (Source : Ifreco (2020)).

1.1 Les revues systématiques

Les revues systématiques sont une **méthode de synthèse bibliographique standardisée** recherchant exhaustivité, robustesse, transparence, répliquabilité et objectivité (**Figure 1.3**). Cette méthode, issue à l'origine du domaine médical, est utilisée dans les secteurs de la société où la science peut éclairer la prise de décision et où l'importance des enjeux exige une rigueur maximale pour tirer des conclusions à partir d'un ensemble d'informations scientifiques. Dans le contexte de crise de la biodiversité actuelle, la gestion et la protection de l'environnement ont plus que jamais besoin d'une source fiable de preuves sur lesquelles fonder la prise de décisions. Les décisions à prendre peuvent potentiellement être controversées et il est donc essentiel qu'elles soient fondées sur les meilleures preuves disponibles et non sur quelques articles scientifiques dont la sélection serait influencée ou sur de simples affirmations ou croyances de groupes d'intérêts particuliers.

Pour que la synthèse des données soit crédible, légitime et fiable, les **normes** relatives à sa conduite doivent être clairement définies. Ces normes comprennent l'examen des sources possibles de biais tant dans les données scientifiques produites au départ que dans la façon dont le processus de synthèse est mené. L'objectif est de fournir à l'utilisateur final un niveau de confiance explicite dans les résultats. Dans le domaine environnemental, ces normes sont édictées par une association internationale : la *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE, <https://environmentalevidence.org/>) qui édite le journal *Environmental Evidence*. La publication dans ce journal garantit à l'utilisateur que la revue systématique respecte les normes de la CEE et que, le cas échéant, tout écart à la norme est explicitement mentionné. Dans le présent travail, c'est cette méthode proposée par la CEE qui a été utilisée et les articles produits ont été publiés dans le journal associé.

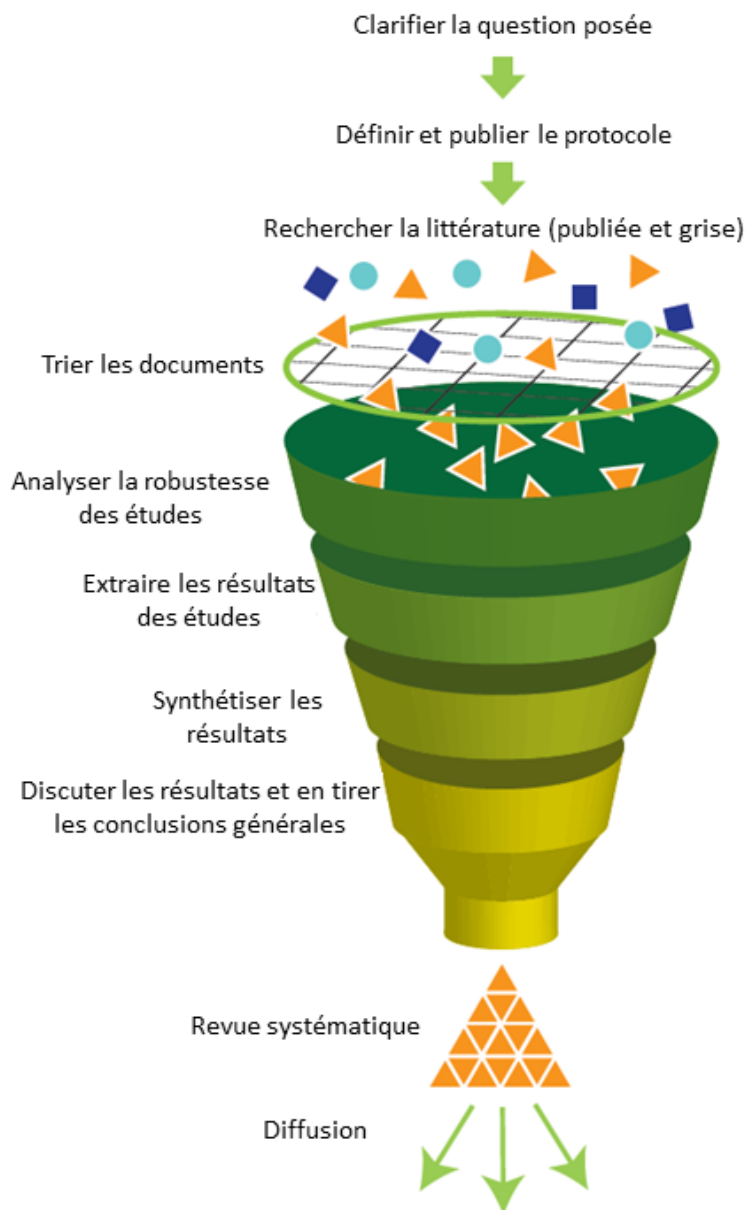


Figure 1.3. Schéma descriptif du processus de synthèse bibliographique par la méthode des revues systématiques. Conception du schéma par Jessica Kaufman, Cochrane Consumers & Communication Review Group, Centre for Health Communication and Participation, La Trobe University, 2011.

1.2 Déroulement du travail

Le travail a été mené par une équipe projet constituée d'experts de la méthode des revues systématiques de l'unité PatriNat (OFB-MNHN-CNRS), d'experts en biologie et écologie des coraux (MNHN), d'experts en écotoxicologie des coraux (MNHN, Centre Scientifique de Monaco, CRIOBE) et d'experts en écotoxicologie et en évaluation des risques des substances chimiques (OFB, Anses, Université de Perpignan). Le déroulement du travail a été suivi, d'une part par un comité de pilotage (identique à celui de la saisine) composé de la Direction de l'Expertise du MNHN, de la Direction de la

Recherche et l'Appui Scientifique de l'OFB, de la Direction de l'évaluation du risque de l'Anses et de la direction de PatriNat, et d'autre part par un comité de suivi composé des membres du comité de pilotage, de la Direction de l'Eau et de la Biodiversité et de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie, et du Ministère des Outre-Mers.

Le sujet étant très vaste (toutes les substances chimiques et tous les types de réponse des coraux devaient être pris en compte), la première étape du travail a consisté à produire une **carte systématique** des impacts des substances chimiques issues de l'activité humaine sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux (Ouedraogo et al., 2021a). Une carte systématique suit le même protocole qu'une revue systématique, mais le processus s'arrête avant l'extraction des résultats des études. La carte systématique permet donc de décrire la connaissance disponible et d'identifier les **manques (knowledge gaps)** et les **amas (knowledge clusters)** de connaissance pour lesquels il est pertinent de poursuivre le travail en revue systématique. L'équipe projet a formulé la question principale de la carte systématique en se concentrant sur les **coraux constructeurs de récifs** qui sont les principales espèces ingénieures des écosystèmes récifaux. Un vaste corpus de littérature scientifique a été trouvé (908 articles, 7937 études) et quatre *knowledge clusters* pertinents ont été identifiés :

- (1) Bioaccumulation des substances chimiques par les coraux (2050 études) ;
- (2) Effets de l'enrichissement en nutriments sur les coraux (2496 études) ;
- (3) Effets des activités humaines sur les coraux (1127 études) ;
- (4) Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux (à l'exception de l'enrichissement en nutriments, études expérimentales uniquement, 2007 études).

Le comité de pilotage du projet a décidé qu'une revue systématique sur les **effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux**, correspondant donc au *knowledge cluster* (4) ci-dessus, devait être réalisée afin de produire les données d'entrée nécessaires pour la seconde partie de la saisine, à savoir l'évaluation des risques écologiques des substances chimiques. En accord avec le comité de suivi, les effets des nutriments sur les coraux n'ont pas été inclus dans la revue systématique, compte tenu du très grand nombre d'études à synthétiser et de l'existence de méta-analyses et de synthèses bibliographiques déjà publiées sur ce sujet (D'Angelo and Wiedenmann, 2014; Pastore, 2014; Risk, 2014; Shantz et al., 2016; Shantz and Burkepile, 2014).

La revue systématique s'est focalisée uniquement sur les études expérimentales, c'est-à-dire pour lesquelles l'exposition est contrôlée par les chercheurs, afin de pouvoir établir un lien de causalité entre l'exposition aux substances chimiques et les effets observés sur les coraux. En effet, les études observationnelles, pour lesquelles l'exposition n'est pas contrôlée, mettent en corrélation des concentrations de substances mesurées dans le milieu avec une réponse des coraux, mais d'autres substances présentes dans le milieu et non mesurées, ou d'autres facteurs biotiques ou abiotiques, pourraient être à l'origine des effets observés. Néanmoins, les études observationnelles rendent compte des réponses des coraux « en conditions de vie réelles », elles ont donc fait l'objet d'une synthèse menée en parallèle et présentée en annexe de ce rapport.

Chapitre 2 Méthodes

Ce chapitre présente brièvement les méthodes utilisées pour établir la carte systématique (recherche et tri de la littérature) et pour synthétiser les résultats pour la revue systématique, l'ensemble des méthodes étant détaillées dans le protocole de la carte (Ouédraogo et al., 2020) et de la revue (Ouédraogo et al., 2021b).

2.1 Définition de la question

2.1.1 Question de la carte systématique

La **carte systématique** répond à la question : **Quelles sont les preuves d'impacts des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux ?**

Cette question se découpe dans les éléments suivants :

- **Population** : Toutes les espèces de coraux constructeurs de récifs tropicaux (espèces scléactiniaires hermatypiques, *Millepora* spp., *Heliopora* spp. et *Tubipora* spp.).
- **Exposition** : Toutes les substances chimiques naturelles (ex. les nitrates), géogéniques (ex. le nickel) et synthétiques (ex. le diuron) provenant des activités humaines.
- **Comparateur** : Population non exposée aux substances chimiques, avant l'exposition aux substances chimiques, ou exposée à une concentration différente de substances chimiques.
- **Réponse mesurée (outcome)** : Toutes les réponses liées aux coraux, du niveau moléculaire (ex. expression des gènes, activité enzymatique) au niveau communauté (ex. couverture corallienne, richesse spécifique).

2.1.2 Question de la revue systématique

La **revue systématique** répond à la question : **Quels sont les effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux ?**

Cette question se découpe dans les éléments suivants :

- **Population** : Toutes les espèces de coraux constructeurs de récifs tropicaux (espèces scléactiniaires hermatypiques, *Millepora* spp., *Heliopora* spp. et *Tubipora* spp.). Tous les stades de développement sont pris en compte (planula mobile, polype fixe), ainsi que tous les compartiments du corail, y compris les symbiotes dinoflagellés "dans l'hôte" et le microbiome.
- **Exposition** : Toutes les substances chimiques géogéniques (ex. les métaux traces) et synthétiques (ex. le diuron) pour lesquels la concentration d'exposition est connue. Les nutriments (ex. les nitrates) sont exclus.
- **Comparateur** : Population non exposée aux substances chimiques ou population avant l'exposition aux substances chimiques. Pour les substances nécessitant l'ajout d'un solvant, une population exposée au solvant uniquement est considérée comme non exposée.
- **Réponse mesurée (outcome)** : Toutes les réponses liées à l'état de santé des coraux, de l'échelle moléculaire (ex. expression des gènes, activité enzymatique) à la colonie (ex. blanchissement) et à la population (ex. taux de mortalité).
- **Type d'étude** : Toutes les études expérimentales, c'est-à-dire pour lesquelles l'exposition est contrôlée par les chercheurs, en laboratoire ou sur le terrain.

2.2 Recherche de la littérature

2.2.1 Equation de recherche

Pour rechercher la littérature permettant de répondre à la question posée, une équation de recherche a été définie comme suit (format *Web of Science*) :

TS=(coral\$ **AND** (contamin* OR pollut* OR toxicant\$ OR chemical\$ OR "industrial discharge\$" OR runoff OR run-off OR sewage OR eutrophication OR effluent\$ OR waste\$water OR waste-water OR "shipping" OR biocide\$ OR "industrial product\$" OR "consumer product\$" OR "household product\$" OR "biocidal product\$" OR disinfect* OR nutrient\$ OR oil OR metal\$ OR pesticide\$ OR herbicide\$ OR insecticide\$ OR fungicide\$ OR antifoul* OR anti-foul* OR organochlorine\$ OR "flame retardant\$" OR detergent\$ OR "perfluorinated compound\$" OR pharmaceutical\$ OR "personal care product\$" OR cosmetic\$ OR PAH\$ OR petroleum OR hydrocarbon\$ OR microplastic\$ OR nanoparticle\$ OR nano-particle\$ OR "endocrine disrupt*" OR "organic compound\$" OR dispersant\$ OR metalloid\$ OR solvent\$ OR petrochemical\$ OR additive\$ OR preservative\$ OR plasticizer\$ OR hormone\$ OR "transformation product\$" OR "degradation product\$" OR byproduct\$ OR by-product\$ OR sunscreen\$ OR "UV filter\$" OR "ultraviolet filter\$" OR antibiotic\$ OR phthalate\$ OR PCB\$ OR cyanide\$ OR chlordecone OR nickel OR copper OR zinc OR cadmium OR mercury OR iron)).

L'expression « TS » indique que la recherche a été effectuée sur les titres, résumés et mots-clefs des publications. Cette équation de recherche a été adaptée selon les différentes sources utilisées.

2.2.2 Sources de littérature

La recherche de littérature principale a été effectuée le 19 mars 2020 dans deux bases de données de publications scientifiques multidisciplinaires : *Scopus (Elsevier)* et *Web Of Science Core Collection (WOS CC, Clarivate Analytics)*.

Cette recherche a été complétée par plusieurs autres sources, permettant notamment de récupérer de la littérature « grise » (rapports, thèses, etc.) :

- 3 moteurs de recherche (*CORE*, <https://core.ac.uk/>, 7 juillet 2020 ; *Google Scholar*, <https://scholar.google.fr/>, 8 Juillet 2020 ; et *GreenFILE*, www.greeninfoonline.com, 8 Juillet 2020)
- 3 moteurs de recherche de thèses (*ProQuest Dissertations and Theses*, <https://search.proquest.com/>, *Publicly Available Content Database* ; *Open Access Theses and Dissertations*, <https://oatd.org/> ; et le moteur de recherche des thèses de doctorats françaises, <https://www.theses.fr/> ; recherche le 15 septembre 2020)
- 11 sites spécialisés (*Australian Institute of Marine Science*, <https://www.aims.gov.au/> ; *Coral Health and Monitoring Program*, NOAA, <https://www.coral.noaa.gov/> ; *Coral traits database*, <https://coraltraits.org/> ; *Ecotox knowledge base of the United States Environmental Protection Agency*, EPA, <https://cfpub.epa.gov/ecotox/> ; IFRECOR, <https://ifrecor.fr> ; IFREMER, <https://wwz.ifremer.fr/> ; *International Coral Reef Initiative*, ICRI, <https://www.icriforum.org/> ; *International Coral Reef Society*, ICRS, <http://coralreefs.org/> ; LabEx CORAIL, <https://www.labex-corail.fr/> ; *ReefBase - A global information system for coral reefs*, <http://www.reefbase.org/> ; *The Endocrine Disruption Exchange List of Potential Endocrine Disruptors*, <https://endocrinedisruption.org/interactive-tools/tedx-list-of-potential-endocrine-disruptors>; recherche entre le 21 Avril et le 29 Mai 2020)
- Un appel à littérature auprès des comités locaux IFRECOR (13 Juillet 2020).

2.3 Tri des documents

2.3.1 Tri pour la carte systématique

Tous les documents récupérés lors de la recherche de littérature ont été triés en deux étapes. Tout d'abord, dans une étape commune, les documents ont été triés sur leur titre et leur résumé, puis, dans une seconde étape, le tri a été effectué sur les textes entiers. Les documents à trier ont été répartis entre quatre personnes. Pour s'assurer que chaque trieur trie de la même manière, un test de cohérence des décisions des trieurs (calcul d'un coefficient Kappa) a été effectué au préalable sur un échantillon commun (14.2% des titres/résumés et 6.7% des textes entiers). Le test a été considéré comme réussi lorsque le coefficient Kappa était supérieur à 0.7. Dans tous les cas, l'ensemble des désaccords entre les trieurs ont été discutés. Par souci de transparence, la liste de tous les articles écartés au tri sur texte entier avec la raison d'exclusion est fournie en annexe de la publication de la carte systématique (fichier additionnel 3 dans Ouédraogo et al. (2021a)).

Tous les documents inclus après les étapes successives de tri ont été divisés en études, une étude étant la combinaison d'un taxon, d'une exposition, et d'une réponse mesurée. Chaque étude a ensuite été codée par plusieurs descripteurs :

- Information bibliographique (identifiants, source, titre, auteur(s), journal, année, DOI, langue, type de document)
- Description générale de l'étude (type d'étude, pays ou territoire, localisation et/ou coordonnées géographiques)
- Description de la population (taxon et niveau du taxon (niveau espèces, genre, ...))
- Description de l'exposition (telle que décrite dans le document et catégorie d'exposition définie par l'équipe projet)
- Description de la réponse mesurée (telle que décrite dans le document et catégorie de réponse définie par l'équipe projet).

Ce codage a été effectué par six personnes. Pour s'assurer que chaque personne code les études de la même manière, un échantillon commun (2% de l'ensemble des documents) a été codé par les six personnes et tous les désaccords ont été discutés.

2.3.2 Tri pour la revue systématique

Les 2007 études correspondant au *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux » ont été sélectionnées pour la revue systématique. Le périmètre de la revue systématique étant plus étroit que celui de la carte systématique, un tri supplémentaire a été effectué pour vérifier trois critères :

- Les concentrations d'exposition sont connues
- Une population non exposée est présente (groupe contrôle)
- L'exposition aux substances chimiques n'est pas combinée à une perturbation physique (ex. sédiments, macroparticules)

Pour s'assurer qu'aucune étude n'a été écartée par erreur, toutes les études rejetées à l'issue de ce tri supplémentaire ont été vérifiées par un autre trieur.

2.4 Analyse de la robustesse des études

Les études sélectionnées pour la revue systématique ont ensuite été examinées à travers une grille de critères pour évaluer dans quelle mesure ces études sont exemptes de biais (*i.e.* déviation systématique du résultat par rapport à la vraie valeur). Ont été examinés : le type de *design* expérimental, la réplication de l'expérience, la mesure des concentrations effectives d'exposition, la présence d'un contrôle solvant le cas échéant, l'absence de différences entre les groupes traités et contrôle (initialement ou dans la façon dont ils sont traités au cours de l'expérience ou dont leurs résultats sont analysés), l'absence de biais d'attrition, et l'absence de tout autre type de biais (**Tableau 2.1**). Un niveau de risque de biais global (risque de biais faible, moyen, ou fort) a ensuite été attribué à chaque étude.

L'analyse de la robustesse des études a été effectuée par deux personnes. Pour s'assurer que les deux personnes analysent les études de la même manière, elles ont analysé un échantillon commun (1% de l'ensemble des études) et tous les désaccords ont été discutés. De plus, tous les cas difficiles ont été discutés avec les experts en écotoxicologie de l'équipe projet, et 10% de toutes les études ont été vérifiées par une autre personne.

Tableau 2.1. Grille des critères d'analyse de la robustesse des études. Le niveau de risque de biais global de l'étude est faible si tous les critères indiquent un risque de biais faible, moyen si au moins un critère indique un risque de biais moyen et aucun critère n'indique un risque de biais fort, et fort si au moins un critère indique un risque de biais fort. C = *control* (témoin) ; E = *exposure* (exposition) ; B = *before* (avant) ; A = *after* (après) ; N/A = non applicable. Voir Sordello et al. (2019) pour plus d'information sur les *designs* expérimentaux.

Biais	Critère	Risque de biais faible	Risque de biais moyen	Risque de biais fort
Biais lié au <i>design</i> expérimental général	Quel est le type de <i>design</i> expérimental ? (quelle comparaison est utilisée pour mesurer l'effet ?)	- CE - BA - BACE		- Inconnu
	L'expérience est-elle répliquée ? (un réplicat n'est pas exposé à l'eau en contact avec les autres réplicats)	- Oui	- Non - Inconnu (supposé non)	
Biais lié à l'exposition	Les concentrations effectives d'exposition ont-elles été mesurées ?	- Oui	- Non - Inconnu (supposé non)	
	Dans le cas où un solvant est utilisé, un contrôle solvant est-il présent ?	- Oui - N/A	- Non - Inconnu (supposé non)	
Biais de sélection	Y'a-t-il des différences au départ entre les groupes C et E ? (y compris différence du milieu d'exposition, différence de modèle biologique)	- Non - N/A (BA design)	- Oui mais l'effet est contrôlé et nul - in situ : oui mais volonté de minimiser les différences	- Oui - Inconnu (supposé oui)
Biais de performance	Y'a-t-il des différences dans la manière dont les groupes C et E (ou B et A) sont traités tout au long de l'expérience ?	- Non		- Oui - Inconnu (supposé oui)
Biais de détection	Y'a-t-il des différences dans la manière d'évaluer les résultats des groupes C et E (ou B et A) ?	- Non		- Oui - Inconnu (supposé oui)
Biais d'attrition	Y'a-t-il des différences dans la manière dont les individus des groupes C et E (ou B et A) sont retirés de l'étude ?	- Non		- Oui - Inconnu (supposé oui)
Autres biais	Existe-t-il une autre source de biais ? (e.g. biais de report des résultats, description insuffisante des méthodes, événement imprévu survenu au cours de l'expérience)	- Non	- Oui mineur	- Oui majeur

2.5 Extraction et synthèse des résultats

Les résultats des études ayant un risque de biais faible ou moyen ont été extraits, par niveau de concentration-durée d'exposition constituant des « **cas d'étude** ». S'il y avait plusieurs durées d'exposition pour une même substance à une même concentration et pour une même espèce, c'est toujours la durée la plus longue qui a été extraite (par exemple dans le cas d'un suivi journalier de la performance de la photosynthèse pendant 7 jours, seule la mesure effectuée le 7^e jour (durée d'exposition la plus longue) a été extraite). Quand plusieurs variables étaient mesurées pour une même réponse (par exemple la densité des algues symbiotiques peut être mesurée directement ou approchée par la concentration en chlorophylle des tissus) c'est toujours la variable la plus précise qui a été extraite. Les informations sur les solvants utilisés et les concentrations effectives testées ont été extraites lorsque c'était possible. Enfin, des informations permettant de contextualiser le résultat ont été extraites comme les conditions de l'expérience (température, pH) et le stade de développement du corail. Des conditions de température supérieure ou égale à 30°C ou de pH inférieur à 8, stressantes pour les coraux, permettent d'évaluer l'effet combiné des substances chimiques et des principales menaces globales qui pèsent sur les coraux, le réchauffement et l'acidification de l'eau de mer.

L'extraction et la synthèse des résultats a été effectuée en deux parties (**Tableau 2.2**). Pour les résultats relatifs à la **mortalité**, la **croissance**, le **recrutement** et la **fertilisation** des coraux ainsi qu'à la **densité** et la **photosynthèse** des **algues symbiotiques**, les résultats ont été synthétisés de façon **quantitative**. La synthèse quantitative a été effectuée pour toutes les catégories de substances. Pour les résultats relatifs à tous les autres *outcomes*, les résultats ont été synthétisés de façon narrative et uniquement pour les catégories de substances qui avaient relativement peu d'études disponibles (Détergents, Dispersants, Filtres ultraviolets, Microplastiques, Nanoparticules, Pharmaceutiques et Autres substances, **Tableau 2.2**).

Les résultats ont été extraits par deux personnes, en séquence par catégorie de substances. Les données d'une catégorie ont été extraites par une ou les deux personnes, et ensuite 10% des cas extraits par une personne ont été vérifiés par l'autre. Chaque désaccord a été discuté et des corrections apportées si nécessaire. Ceci a permis de s'assurer de la cohérence de l'extraction des résultats tout au long du processus.

Tableau 2.2. Stratégie d'extraction et de synthèse des résultats, selon les catégories d'exposition et de réponse mesurée.

	Hydrocarbures, Métaux, Pesticides	Détergents, Dispersants, Filtres ultraviolets, Microplastiques, Nanoparticules, Pharmaceutiques et Autres substances.
Mortalité, croissance, recrutement, fertilisation des coraux, densité et photosynthèse des algues symbiotiques	Synthèse quantitative	Synthèse quantitative
Toutes les autres réponses mesurées	Non inclus dans la synthèse	Synthèse narrative

2.5.1 Synthèse quantitative

Les données quantitatives ont été extraites du texte, des tableaux, et des figures à l'aide du package R metaDigitise (Pick et al., 2019). Pour chaque cas d'étude – *i.e.* concentration-durée d'exposition, la taille de l'échantillon, la moyenne et une mesure de la variation de la moyenne (par exemple, l'écart type) ont été extraits pour le groupe témoin et le groupe exposé.

Une **différence de moyennes standardisée** d_i a été calculée comme suit (Hedges' d, Hedges and Olkin (1985)) :

$$d_i = ((\bar{X}_{traité_i} - \bar{X}_{contrôle_i}) / S_{commune_i}) * J_i$$

où $\bar{X}_{traité_i}$ est la moyenne pour la concentration-durée i du groupe traité et $\bar{X}_{contrôle_i}$ est la moyenne du groupe contrôle ($S_{commune_i}$ est la déviation standard commune des deux groupes et J_i est un facteur de correction pour les petites tailles d'échantillons, Hedges and Olkin (1985)). Ainsi, si d_i est positif, cela signifie que le traitement (la concentration-durée testée) augmente l'outcome mesuré (ex. la mortalité ou la croissance), si d_i est négatif que le traitement diminue l'outcome mesuré, et si d_i est nul, cela signifie qu'il n'y a pas de différence entre le traitement et le contrôle (**Figure 2.1**). Pour chaque d_i un intervalle de confiance (IC) à 95% a été calculé ($d_i \pm 1.96 * \sqrt{var_i}$, avec var_i la variance de d_i calculée selon l'équation 8 dans Hedges (1982)). Si cet intervalle de confiance comprend le zéro, cela signifie qu'il n'y a pas de **différence statistiquement significative** entre le traitement et le contrôle.

Il faut noter que

- le d_i s'interprète toujours par rapport à l'outcome mesuré, ainsi un d_i positif dans le cas de mesures de croissance indique une augmentation de la croissance avec la concentration-durée testée et donc un effet positif pour le corail mais un d_i positif dans le cas de mesures de mortalité indique une augmentation de la mortalité avec la concentration-durée testée et donc un effet négatif pour le corail ;
- le d_i n'a pas pu être calculé si les auteurs n'ont pas indiqué dans le texte, les tableaux ou les figures de l'article la moyenne et la taille de l'échantillon des groupes traité et contrôle ;
- si un solvant a été utilisé c'est le contrôle solvant qui a été considéré comme groupe contrôle pour calculer d_i , sauf quand la donnée n'était pas disponible.

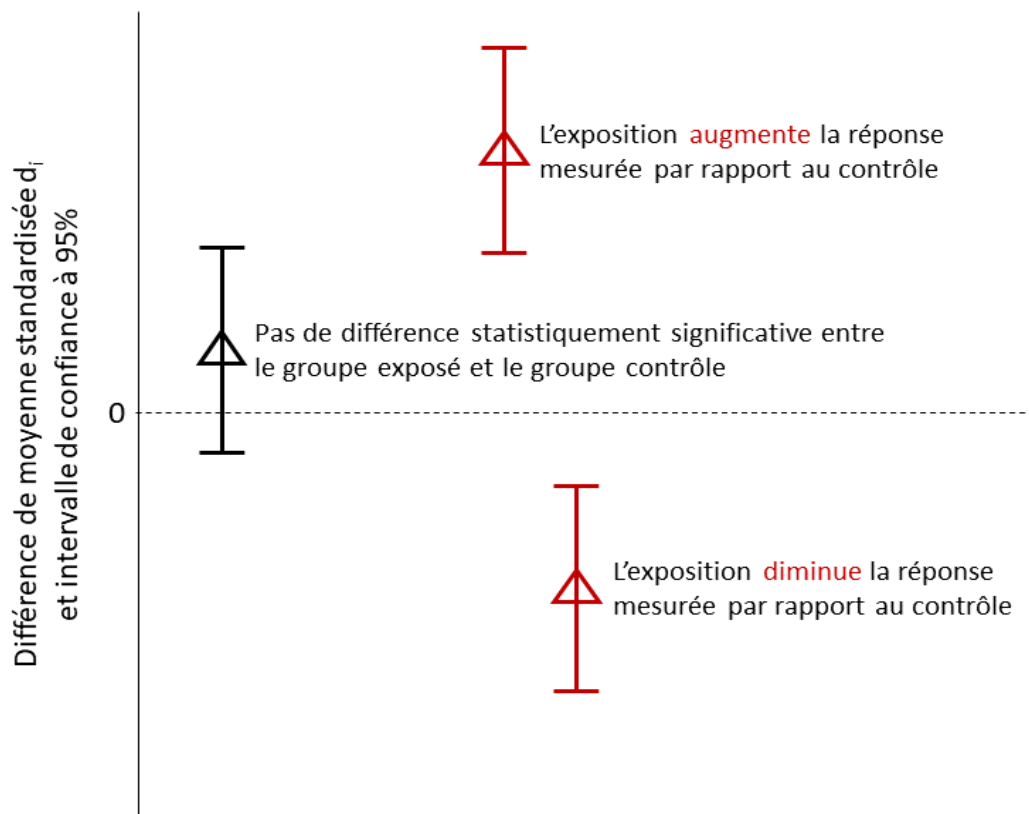


Figure 2.1. Schéma explicatif pour l'interprétation de la différence de moyennes standardisée.

2.5.2 Synthèse narrative

Pour chaque cas d'étude (concentration-durée d'exposition testée), le résultat est extrait dans une table narrative qui indique, d'une part le résultat textuel c'est à dire si l'exposition entraîne une augmentation, une diminution ou aucun effet statistiquement significatif sur l'outcome mesuré, et d'autre part l'interprétation pour le corail c'est à dire si l'effet est positif, négatif, ou nul pour le corail. Il faut noter que lorsque les résultats sont uniquement descriptifs, **sans test de la significativité statistique** des différences observées entre les groupes traités et contrôle, **les résultats ne sont pas extraits**.

Chapitre 3 Résultats de la carte systématique

Ce chapitre présente brièvement les résultats de la carte systématique sur les impacts des substances chimiques issues de l'activité humaine sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux, les résultats étant détaillés dans la publication en accès libre (Ouédraogo et al., 2021a).

3.1 Description

L'impact des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux est bien étudié : **908 documents** sur le sujet ont été rassemblés, correspondant à **7937 études**, une étude étant la combinaison d'un taxon, d'une exposition, et d'une réponse mesurée (**Figure 3.1**).

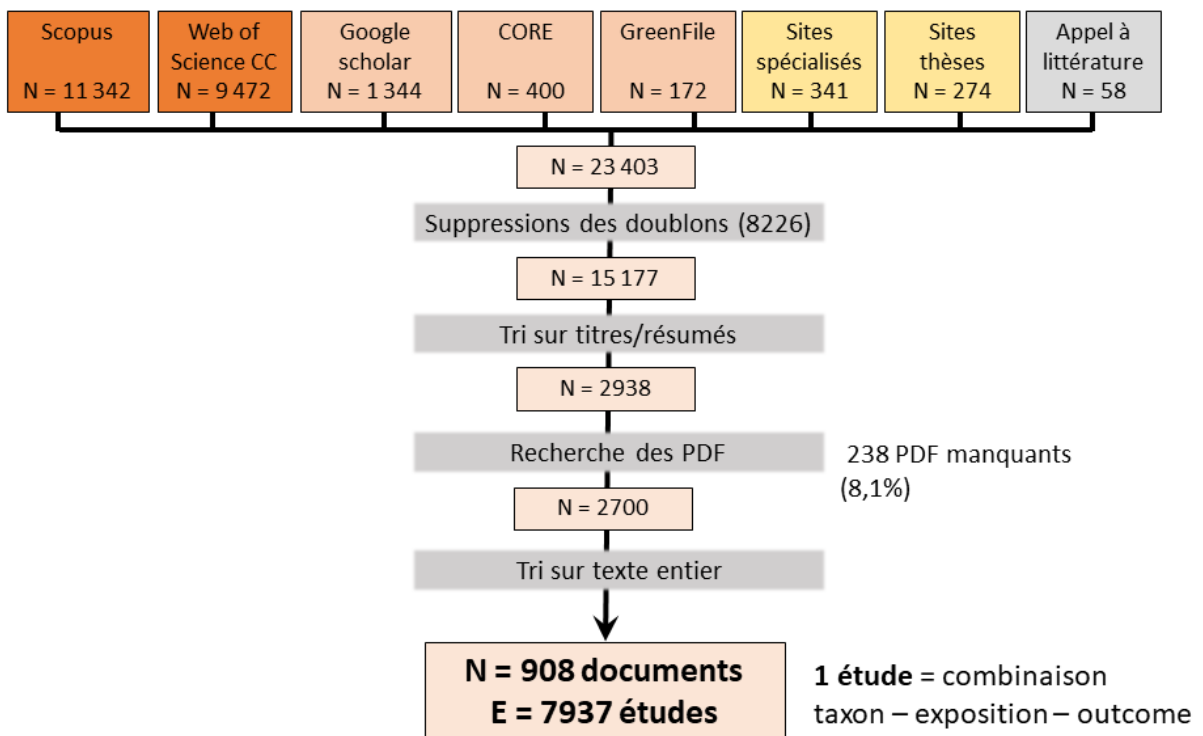


Figure 3.1. Diagramme décrivant le processus de recherche et de tri de la littérature pour la carte systématique.

Sur les 908 documents :

- la moitié sont parus depuis 2010
- 88% sont des articles scientifiques
- 4.4% concernent les Territoires d'Outre-Mer français (40 documents, principalement la Polynésie Française (10 documents), la Réunion (10 documents) et la Nouvelle Calédonie (9 documents)).

3.2 Knowledge clusters

La carte systématique a permis d'identifier quatre *knowledge clusters* principaux :

- Bioaccumulation des substances chimiques par les coraux (2050 études)
- Effets de l'enrichissement en nutriments sur les coraux (2496 études)
- Effets des activités humaines sur les coraux sans référence à une substance chimique (1127 études)
- Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux (à l'exception de l'enrichissement en nutriments, études expérimentales uniquement, 2007 études).

3.3 Knowledge gaps

La carte systématique a aussi permis de mettre en évidence un manque de recherche expérimentale sur les effets combinés de plusieurs (3 et plus) catégories de substances chimiques, alors que les études observationnelles rassemblées dans la carte montrent que, dans leur milieu naturel, les coraux sont effectivement exposés à ces mélanges de substances. Un effort de recherche sur ces effets "cocktail" combinant plusieurs catégories de substances est donc préconisé.

La carte systématique a également révélé un certain décalage entre la quantité de littérature disponible sur l'impact des produits chimiques sur les coraux d'un pays et la surface de récifs coralliens de ce pays. Par exemple, les coraux des États-Unis d'Amérique et leurs territoires associés ont été les plus étudiés (pays au premier rang dans la carte en nombre de documents avec 160 documents) alors que les États-Unis ne sont qu'au 16^e rang mondial en termes de superficie de récifs (**Tableau 3.1**). En revanche, les Philippines sont classées au troisième rang mondial en termes de superficie des récifs, mais seulement 23 documents portaient sur les coraux de ce pays. Ce décalage n'est pas observé pour les Territoires d'Outre-Mer français qui se placent à la 4^e place tant en termes de superficie de récifs que de nombre de documents dans la carte systématique.

Tableau 3.1. Liste des pays les plus représentés dans la carte systématique (nombre de documents N) avec leur surface de récifs coralliens (A, km²) d'après Sheppard et al. (2018).

Pays	N documents	Rang N	A (km ²)	Rang mondial A
États-Unis d'Amérique et territoires	160	1	3 770	16
Australie	121	2	48 960	2
Indonésie	45	3	51 020	1
Territoires d'Outre-Mer français	40	4	14 280	4
Chine	35	5	< 2 720	< 24
Israël	33	6	< 2 720	< 24
Japon	31	7	2 900	23
Panama	29	8	< 2 720	< 24
Jordanie	27	9	< 2 720	< 24
Royaume Uni et territoires	24	10	5 510	12
Philippines	23	11	25 060	3
Égypte	22	12	3 800	15
Arabie Saoudite	21	13	6 660	8
Mexique	20	14	< 2 720	< 24

Chapitre 4 Métaux

Ce chapitre présente la synthèse quantitative des résultats pour le groupe des **métaux**.

4.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 481 études expérimentales correspondant à 77 documents traitent d'une exposition aux métaux, mais 34 études ont été exclues car il n'y avait pas de groupe contrôle (22 études) et/ou les concentrations d'exposition étaient inconnues (5 études), car l'expérience consistait en un épuisement de la concentration en métal (inverse d'une exposition, 6 études), ou encore parce que l'exposition était combinée à une exposition à des macroparticules (5 études). Pour le groupe des métaux, la synthèse des résultats est uniquement quantitative et porte sur les résultats relatifs à la **mortalité**, la **croissance**, le **recrutement** et la **fertilisation** des coraux, et à la **densité** et la **photosynthèse** des **algues symbiotiques**. Les 144 études non comprises dans ce périmètre ont donc également été exclues.

4.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **303 études** a montré que :

- **1 étude / 1 document** avait un niveau de **risque de biais fort** à cause d'une description très insuffisante des méthodes qui ne permet pas, notamment, de savoir s'il y a des différences au départ entre les groupes contrôle et traité.
- **140 études / 33 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesures des concentrations effectives d'exposition (138 études). Les 2 études qui mesuraient les concentrations effectives d'exposition n'étaient pas répliquées.
- **162 études / 32 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.¹

4.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 302 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 41 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible pour 63 études, ou les données étaient déjà présentées dans un autre article pour 16 études) ;

¹ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

- l'exposition était associée à un stress supplémentaire autre que la température ou l'acidification (par ex. une exposition aux UV ou à une baisse de la salinité) (4 études) ;
- les études étaient des erreurs de metacoding (2 études).

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

4.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse quantitative est basée sur **176 études / 50 documents**, correspondant à **683 cas** de concentration-durée d'exposition (Annexe C). Les 50 documents sont 47 articles de revues scientifiques, un chapitre de thèse de doctorat, un rapport et un acte de colloque. Ils datent de 1988 à 2020. Les 176 études testent l'exposition à 13 métaux – le cuivre étant la substance ayant le plus d'information (311 cas) – 2 combinaisons de métaux et 2 combinaisons de métal et nutriment. Des expositions à un mélange de métaux contenus dans les eaux usées d'une raffinerie d'aluminium, à du lixiviat de charbon (mélange d'hydrocarbures et de métaux) et à 3 peintures « antifouling » (mélange de pesticides et de métaux) sont aussi testées (**Tableau 4.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 30 espèces différentes (**Tableau 4.2**), principalement *Acropora tenuis* (144 cas), *Coelastrea aspera* (79 cas) et *Pocillopora damicornis* (52 cas). La fertilisation est le plus souvent mesurée (280 cas) avec le recrutement (128 cas), puis la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (92 cas), la densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 92 cas), la mortalité (56 cas) et la croissance (35 cas).

4.5 Synthèse des résultats

Les **50 documents (176 études)** ayant alimenté cette synthèse quantitative sont listés en Annexe C. Les résultats (d_i et intervalle de confiance à 95%) sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Certaines expériences ont testé l'effet d'un métal ainsi que l'effet combiné de ce métal et d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$), ou certaines expériences étaient réalisées dans des conditions acides pour les coraux ($\text{pH} < 7.8$). Les résultats sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 4.1 à 4.10** et le **Tableau 4.3** résume l'ensemble des résultats obtenus.

En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à l'**aluminium**, le **cadmium**, le **cobalt**, le **cuivre**, le **fer**, le **gallium**, le **mercure**, le **manganèse**, le **nickel**, le **plomb**, la **silice**, le **vanadium** et le **zinc** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. Les expositions combinées de fer et nitrate ou de nickel et d'urée, ainsi que l'exposition au lixiviat de charbon ou aux produits « antifouling » à base de pesticides et de métaux (cuivre et/ou zinc) ont également entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour les expositions combinées de fer et manganèse (densité et performance de la photosynthèse des algues symbiotiques, croissance) et de nickel et cobalt (fertilisation), pour les concentrations-durées testées.

Certains effets à première vue « positifs » observés peuvent tout d'abord s'expliquer par une absence d'effet (ou peu d'effet) de l'exposition et une forte variabilité naturelle des réponses. Par exemple,

le succès de fertilisation est très variable pour les groupes contrôles (de 21 à 99%), entraînant dans certains cas une valeur plus faible dans le groupe contrôle que dans le groupe traité. Les conditions de laboratoire peuvent également se révéler très stressantes pour certaines espèces de coraux et des différences de sensibilité non identifiées entre les individus des groupes contrôle et traité peuvent entraîner ces effets faussement positifs. Ces effets peuvent être clarifiés en répétant les expériences, en évaluant l'état des coraux du groupe contrôle et/ou en augmentant la gamme des concentrations testées. Par exemple, une exposition au cuivre à des concentrations de 20, 50 et 100 µg/L peut augmenter le succès de fertilisation du corail *Platygyra acuta*, mais une exposition à des concentrations de 200, 500 et 1000 µg/L le diminue fortement (**Figure 4.1**).

Certains effets « positifs » peuvent en revanche être réellement induit par l'exposition, mais ils doivent être interprétés avec précaution. Par exemple, une exposition au cuivre à des concentrations de 25 et 50 µg/L n'a pas d'effet sur le recrutement des larves de *Platygyra acuta*, mais augmente le succès du recrutement aux concentrations 100 et 200 µg/L (**Figure 4.2**). Les auteurs de l'étude soulignent que le succès de recrutement était très faible dans les groupes contrôles car leur expérience n'utilisait pas d'inducteurs de recrutement naturels, contrairement à ce qui est habituellement pratiqué, et ils suggèrent que l'effet positif sur le recrutement observé aux plus fortes concentrations testées pourrait être une réponse des larves pour échapper au stress chimique, le stade polype étant plus avantageux pour la survie que le stade larvaire. Par ailleurs, l'exposition peut avoir des effets positifs pour l'algue symbiotique du corail (augmentation de la densité, de la performance de la photosynthèse) mais perturber l'équilibre entre le symbionte et l'hôte, induisant ainsi des effets négatifs pour le corail (diminution de la croissance).

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 4.1 à 4.10**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. La **Figure 4.11** présente, à titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif qu'il est possible de déterminer pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Ces seuils vont de 4 µg/L (cuivre, recrutement) à 60 mg/L (manganèse, fertilisation) lorsque seules les études présentant un faible risque de biais sont prises en compte, et de 0.65 µg/L (cuivre, fertilisation) à 60 mg/L (manganèse, fertilisation) lorsque toutes les études sont prises en compte. Le cuivre est la substance présentant le plus d'information (15 seuils déterminés) et les seuils les plus faibles.

Tableau 4.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
Aluminium (AlCl ₃) (Al)	7446-70-0
Cadmium (CdCl ₂ , CdNO ₃) (Cd)	10108-64-2, 10325-94-7
Cobalt (CoCl ₂ , CoNO ₃) (Co)	7646-79-9, 10141-05-6
Cuivre (CuCl ₂ , CuHNO ₃ , CuSO ₄) (Cu)	7447-39-4, 3251-23-8, 7758-98-7
Fer (FeCl ₂ , FeCl ₃ , FeNO ₃) (Fe)	7758-94-3, 7705-08-0, 10421-48-4
Gallium (GaCl ₃) (Ga)	13450-90-3
Mercurure (HgCl ₂) (Hg)	7487-94-7
Manganèse (MnCl ₂) (Mn)	7773-01-5
Nickel (NiCl ₂ , NiNO ₃) (Ni)	17638-48-1, 13138-45-9
Plomb (PbNO ₃) (Pb)	10099-74-8
Silice (SiO ₂) (Si)	7631-86-9
Vanadium (VCl ₃) (V)	7718-98-1
Zinc (ZnCl ₂ , ZnSO ₄) (Zn)	7646-85-7, 7733-02-0
<hr/>	
Fer & Manganèse (Fe & Mn)	
Fer & Nitrate (Fe & Nitrate)	
Nickel & Cobalt (Ni & Co)	
Nickel & Urea (Ni & Urea)	
<hr/>	
Alumina refinery wastewater (Al, V, Ga, As, Mo, Ni, Zn, U) (Wastewater)	
Coal leachate (Coal leach.)	
Cu-based antifoulant paints (540-565 g/L cuprous oxide, 40-50g/L diuron) (Cu-Antifoul)	
TBT-based antifoulant paints (20g/L tributyltin oxide, 100-200g/L cuprous oxide) (TBT-Antifoul)	
Sediment contaminated with antifoulant paint containing tributyltin, dibutyltin, monobutyltin, zinc, and copper (Sed. Antifoul)	

Tableau 4.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Fertilisation	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Croissance
<i>Acropora tenuis</i> (Acr.ten)	64	80				
<i>Coelastrea aspera</i> (Coe.asp)	54				25	
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)		2	18	26		6
<i>Platygyra daedalea</i> (Pla.dae)	44				7	
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)			17	15		16
<i>Mussismilia harttii</i> (Mus.har)			18	27		
<i>Platygyra acuta</i> (Pla.acu)	16	12			14	
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)			20	11	1	8
<i>Acropora millepora</i> (Acr.mil)	10	28				
<i>Acropora spathulata</i> (Acr.spa)	24				5	
<i>Montipora capitata</i> (Mon.cap)	18					
<i>Acropora longicyathus</i> (Acr.lon)	14					
<i>Porites lutea</i> (Por.lut)			8	2		
<i>Acropora microphthalma</i> (Acr.mic)		6			3	
<i>Acropora cervicornis</i> (Acr.cer)				5		3
<i>Goniastrea retiformis</i> (Gon.ret)	7					
<i>Acropora hyacinthus</i> (Acr.hya)	6					
<i>Favites chinensis</i> (Fav.chi)	6					
<i>Acropora cytherea</i> (Acr.cyt)	5					
<i>Acropora pulchra</i> (Acr.pul)	5					
<i>Platygyra ryukyuensis</i> (Pla.ruy)	4					
<i>Porites astreoides</i> (Por.ast)			3		1	
<i>Acropora aspera</i> (Acr.asp)			3			
<i>Orbicella franksi</i> (Orb.fra)			3			
<i>Oxypora lacera</i> (Oxy.lac)	3					
<i>Dendrophyllia arbuscula</i> (Den.arb)						2
<i>Fungia sp.</i> (Fun.sp.)				2		
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Poc.ver)			1	1		
<i>Porites cylindrica</i> (Por.cyl)				2		
<i>Seriatopora hystrix</i> (Ser.hys)			1	1		
Total	280	128	92	92	56	35

Tableau 4.3. Résumé des résultats par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées.

Exposition	Fertilisation	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Croissance	Résumé
Aluminium (AlCl ₃) (Al)	Oui	Oui					Oui
Cadmium (CdCl ₂ , CdNO ₃) (Cd)	Oui		Oui				Oui
Cobalt (CoCl ₂ , CoNO ₃) (Co)	NS			NS		Oui	Oui
Cuivre (CuCl ₂ , CuHNO ₃ , CuSO ₄) (Cu)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Fer (FeCl ₂ , FeCl ₃ , FeNO ₃) (Fe)	Oui		Oui	NS	Oui	Oui	Oui
Gallium (GaCl ₃) (Ga)	Oui	Oui					Oui
Mercure (HgCl ₂) (Hg)			Oui		NS		Oui
Manganèse (MnCl ₂) (Mn)	Oui		NS	NS	Oui	NS	Oui
Nickel (NiCl ₂ , NiNO ₃) (Ni)	Oui	NS	Oui	NS		NS	Oui
Plomb (PbNO ₃) (Pb)	Oui		Oui	Oui	Oui		Oui
Silice (SiO ₂) (Si)					Oui		Oui
Vanadium (VCl ₃) (V)	Oui	Oui					Oui
Zinc (ZnCl ₂ , ZnSO ₄) (Zn)	Oui		Oui	NS		Oui	Oui
Fer & Manganèse (Fe & Mn)			NS	NS		NS	NS
Fer & Nitrate (Fe & Nitrate)			NS	Oui		Oui	Oui
Nickel & Cobalt (Ni & Co)	NS						NS
Nickel & Urea (Ni & Urea)			Oui	NS		NS	Oui
Alumina refinery wastewater (Al, V, Ga, As, Mo, Ni, Zn, U) (Wastewater)	Oui	Oui					Oui
Coal leachate (Coal leach.)	Oui	Oui					Oui
Cu-based antifoulant paints (540-565 g/L cuprous oxide, 40-50g/L diuron) (Cu-Antifoul)	Oui	Oui					Oui
TBT-based antifoulant paints (20g/L tributyltin oxide, 100-200g/L cuprous oxide) (TBT-Antifoul)	Oui	Oui					Oui
Sediment contaminated with antifoulant paint containing tributyltin, dibutyltin, monobutyltin, zinc, and copper (Sed. Antifoul)		Oui	NS	Oui	Oui		Oui

Fertilisation - Cu

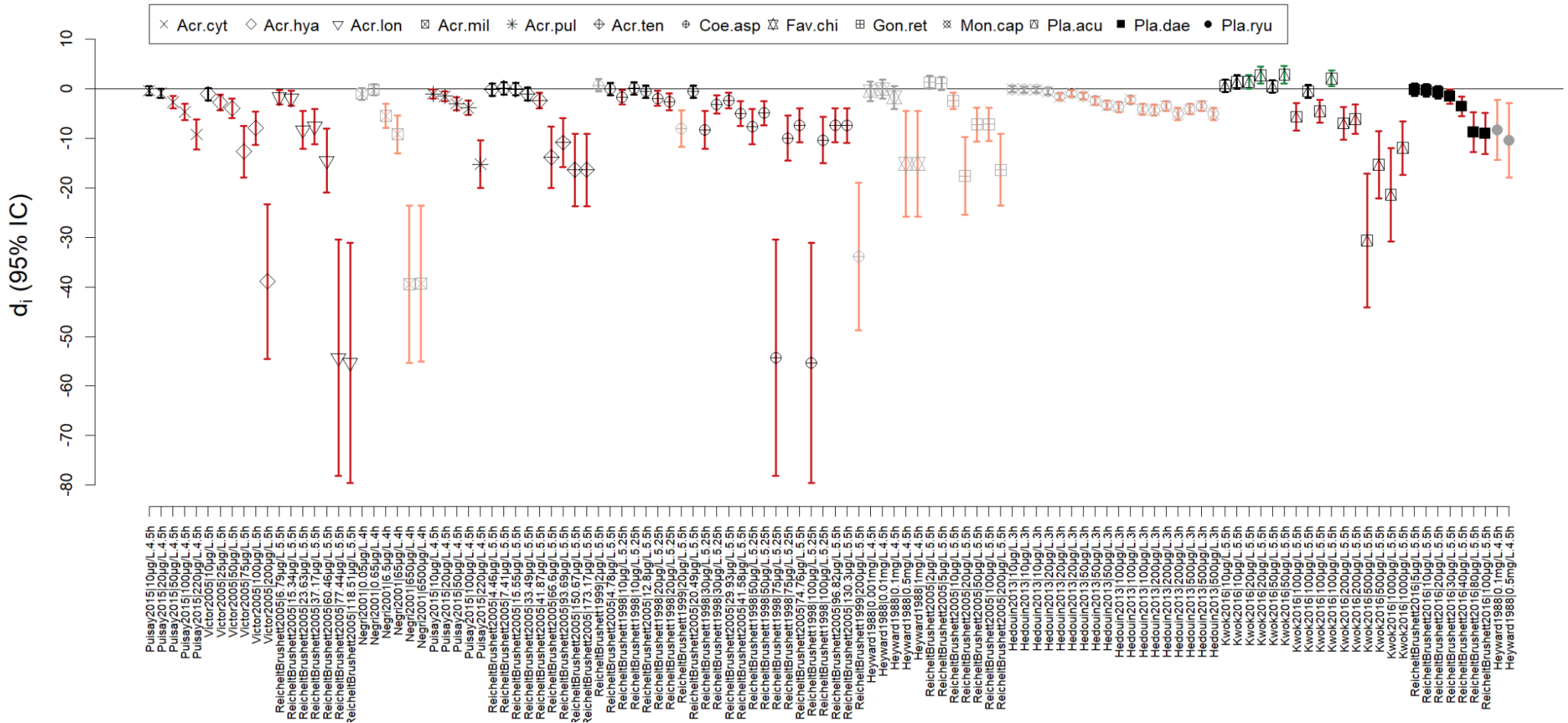


Figure 4.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du cuivre sur le succès de la fertilisation. Les valeurs sont ordonnées par espèce et par concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Recrutement - Cu

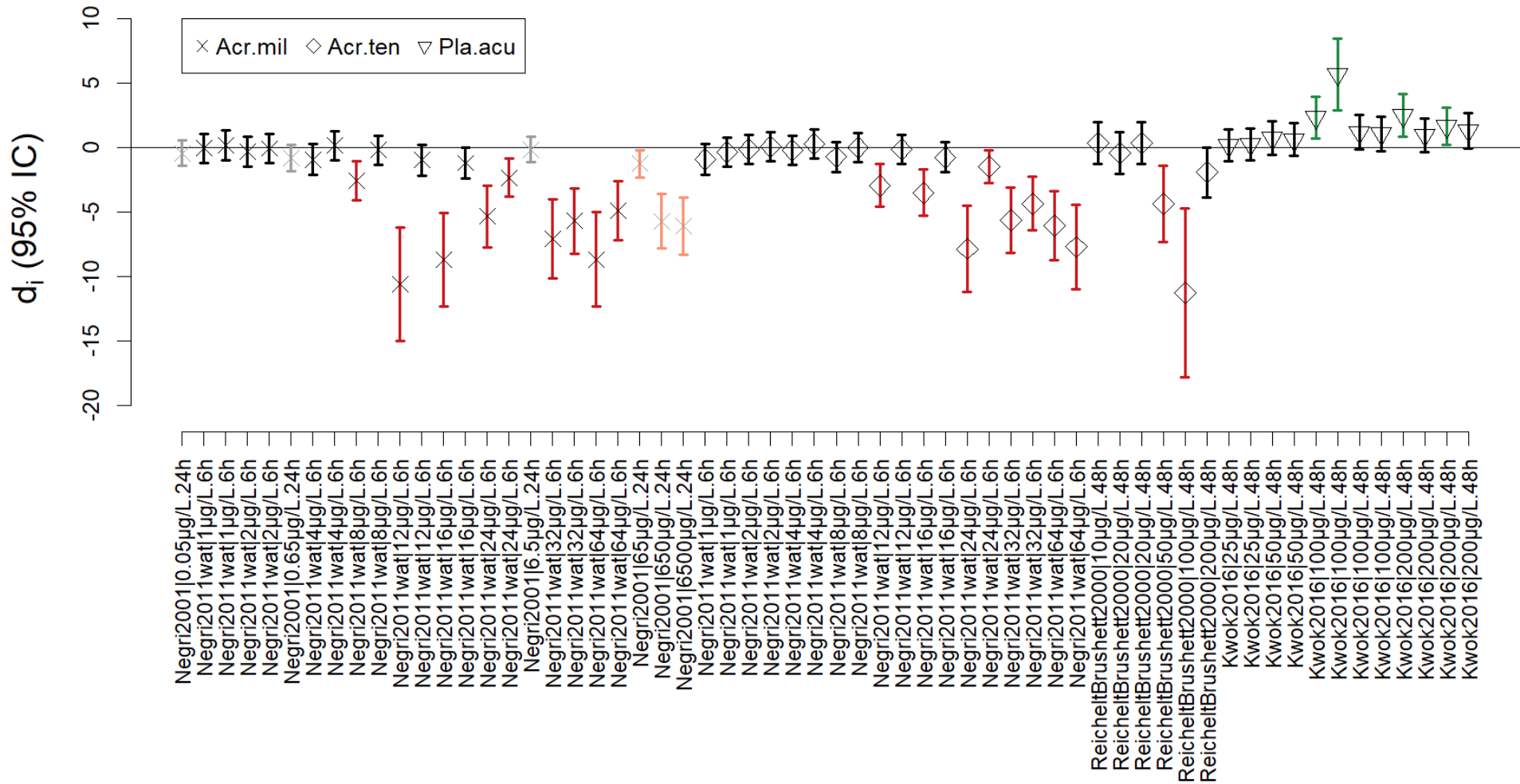


Figure 4.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du cuivre sur le succès du recrutement des larves de corail. Les valeurs sont ordonnées par espèce et par concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Densité d'algues symbiotiques - Cu

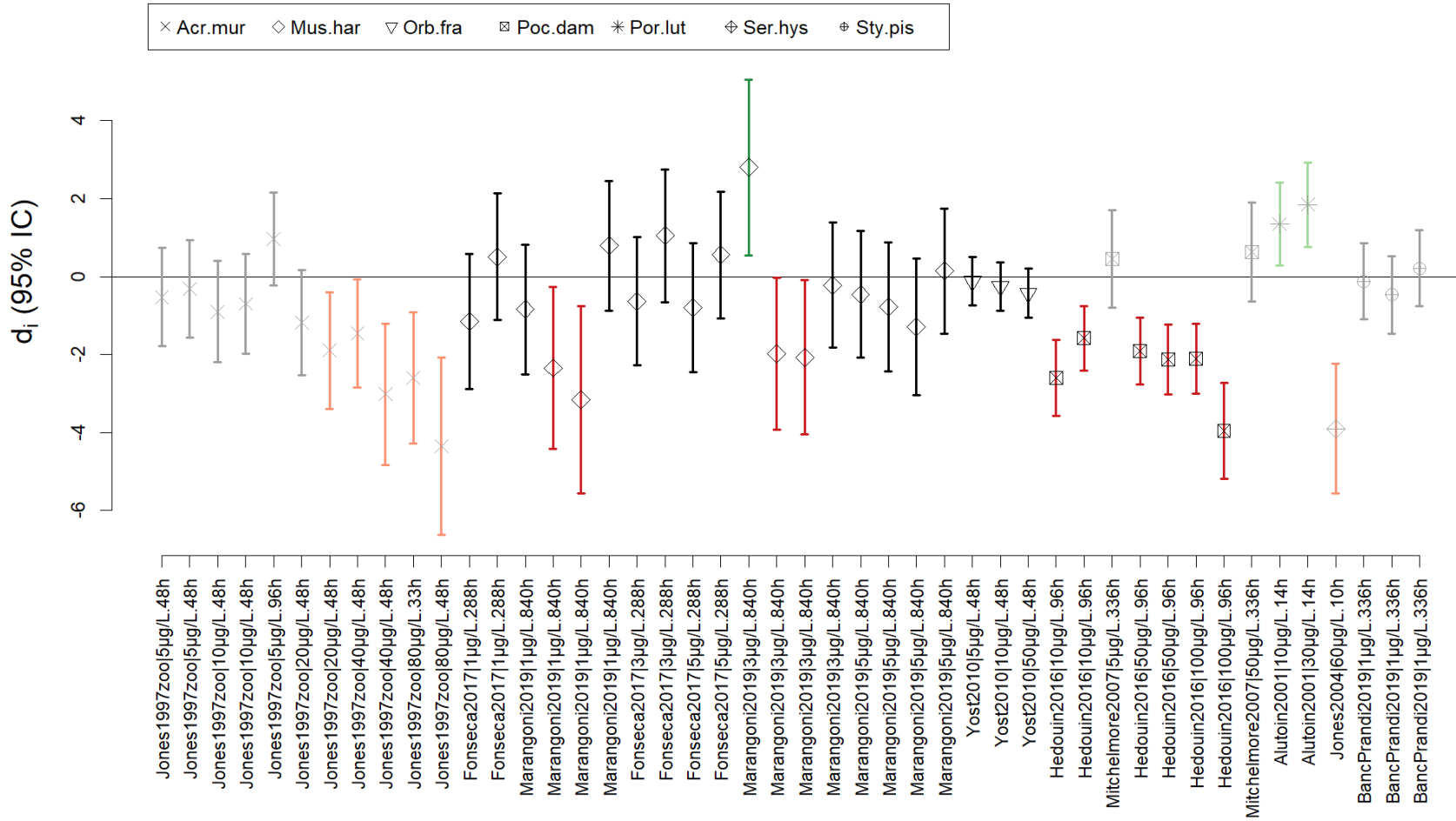


Figure 4.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du cuivre sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par espèce et par concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Performance de la photosynthèse - Cu

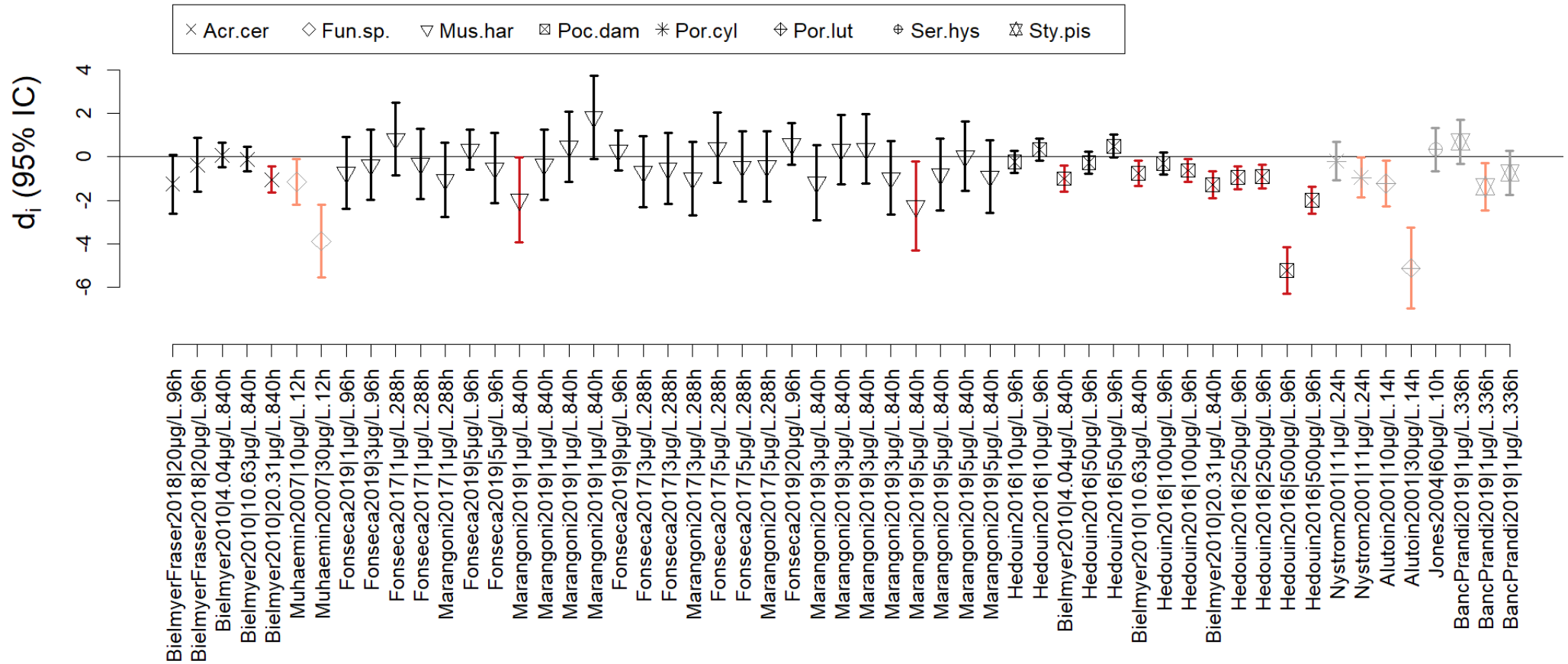


Figure 4.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du cuivre sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par espèce et par concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

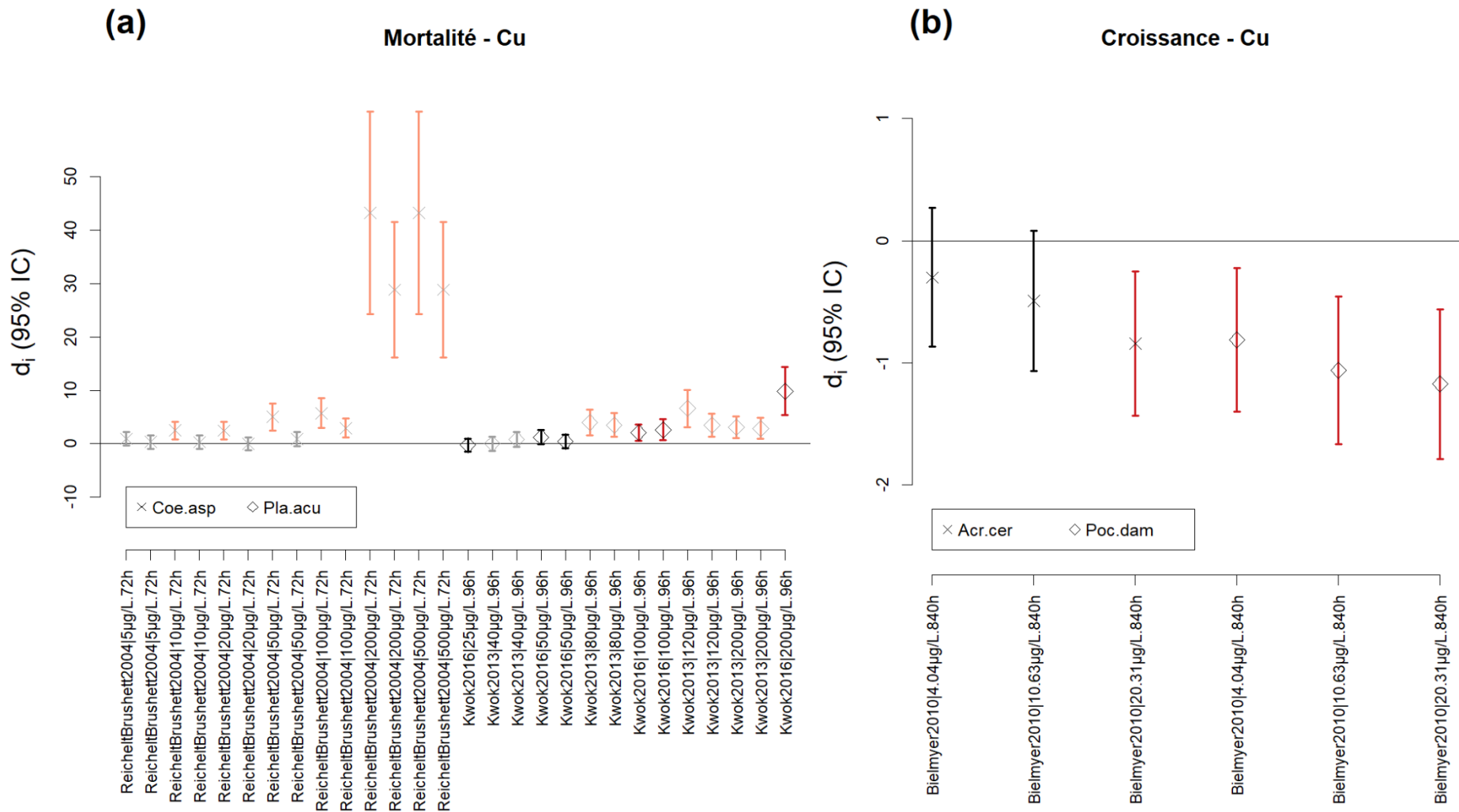


Figure 4.5. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du cuivre sur **(a)** la mortalité (des gamètes et des larves) et **(b)** la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par espèce et par concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

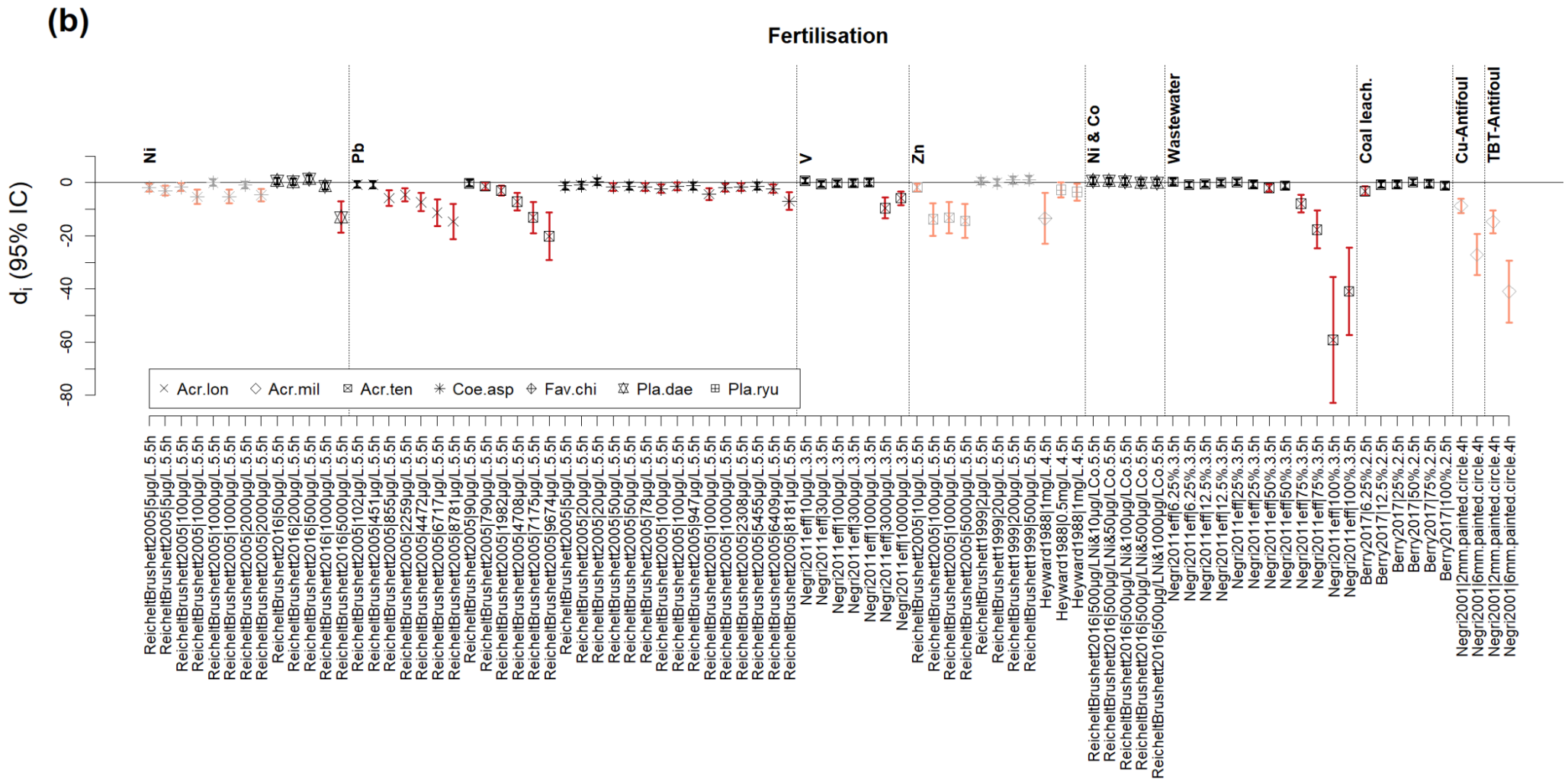


Figure 4.6b. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des métaux autres que le cuivre sur le succès de la fertilisation des coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 4.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

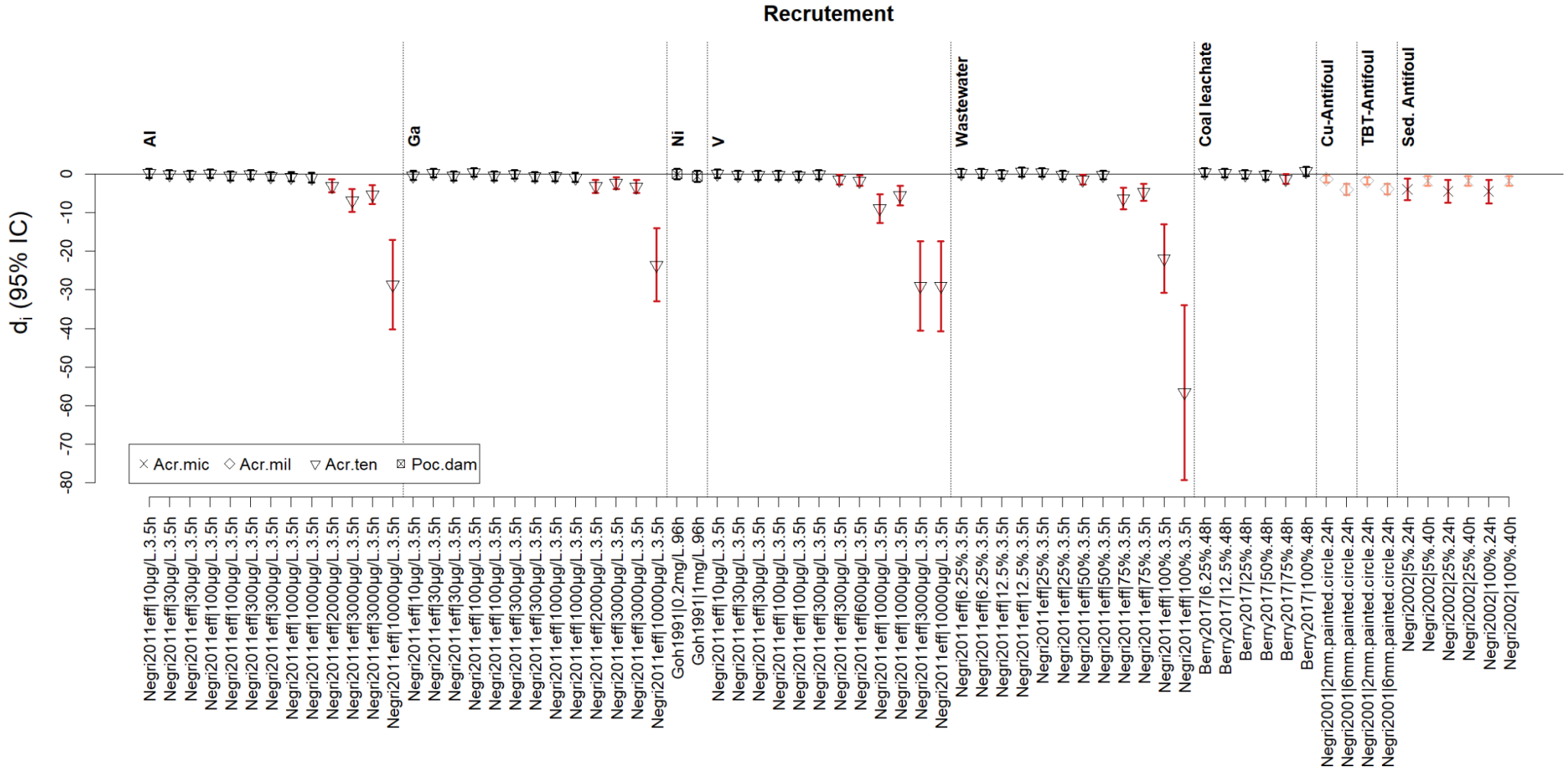


Figure 4.7. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des métaux autres que le cuivre sur le succès du recrutement des larves de corail. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 4.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

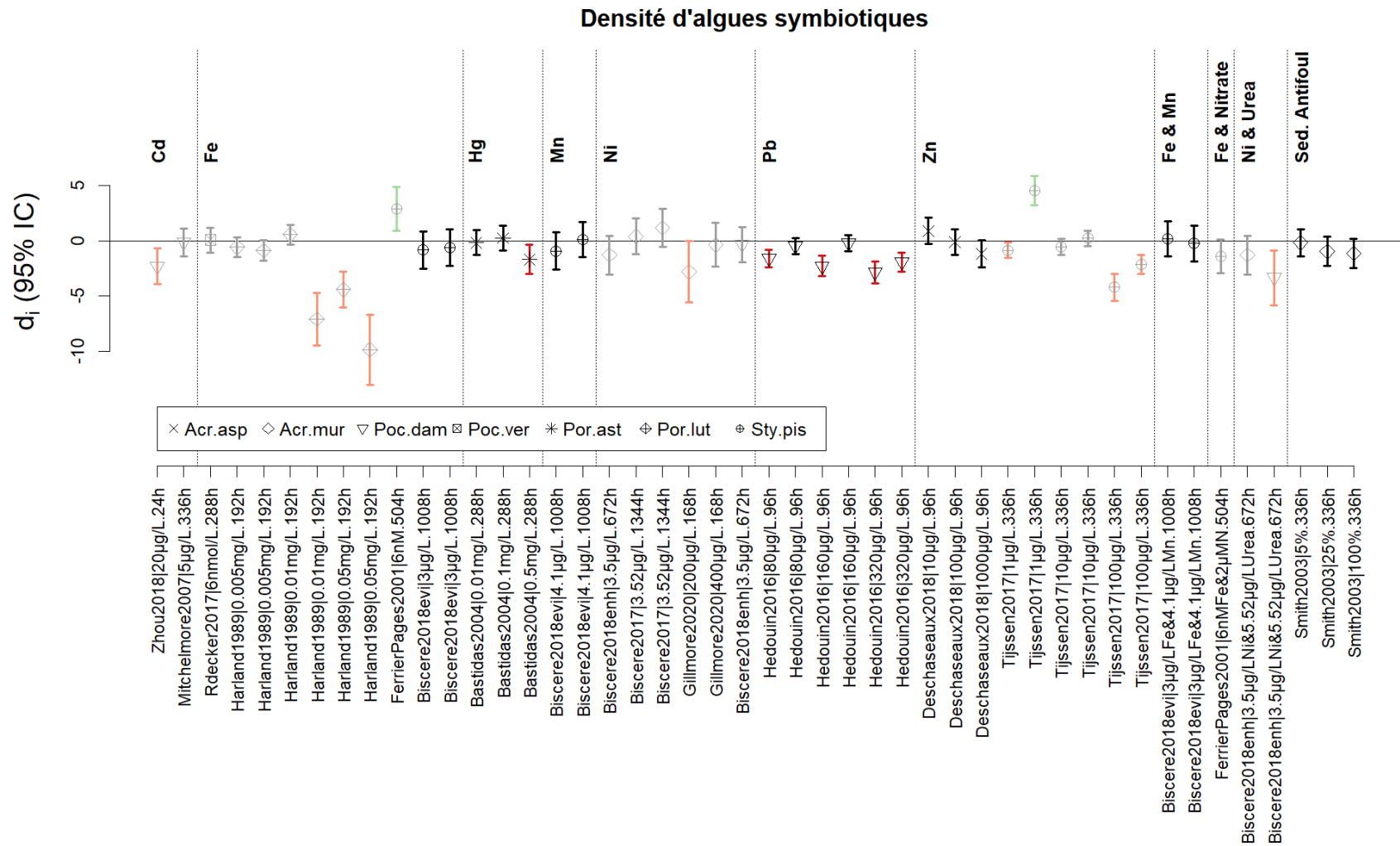


Figure 4.8. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des métaux autres que le cuivre sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 4.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Performance de la photosynthèse

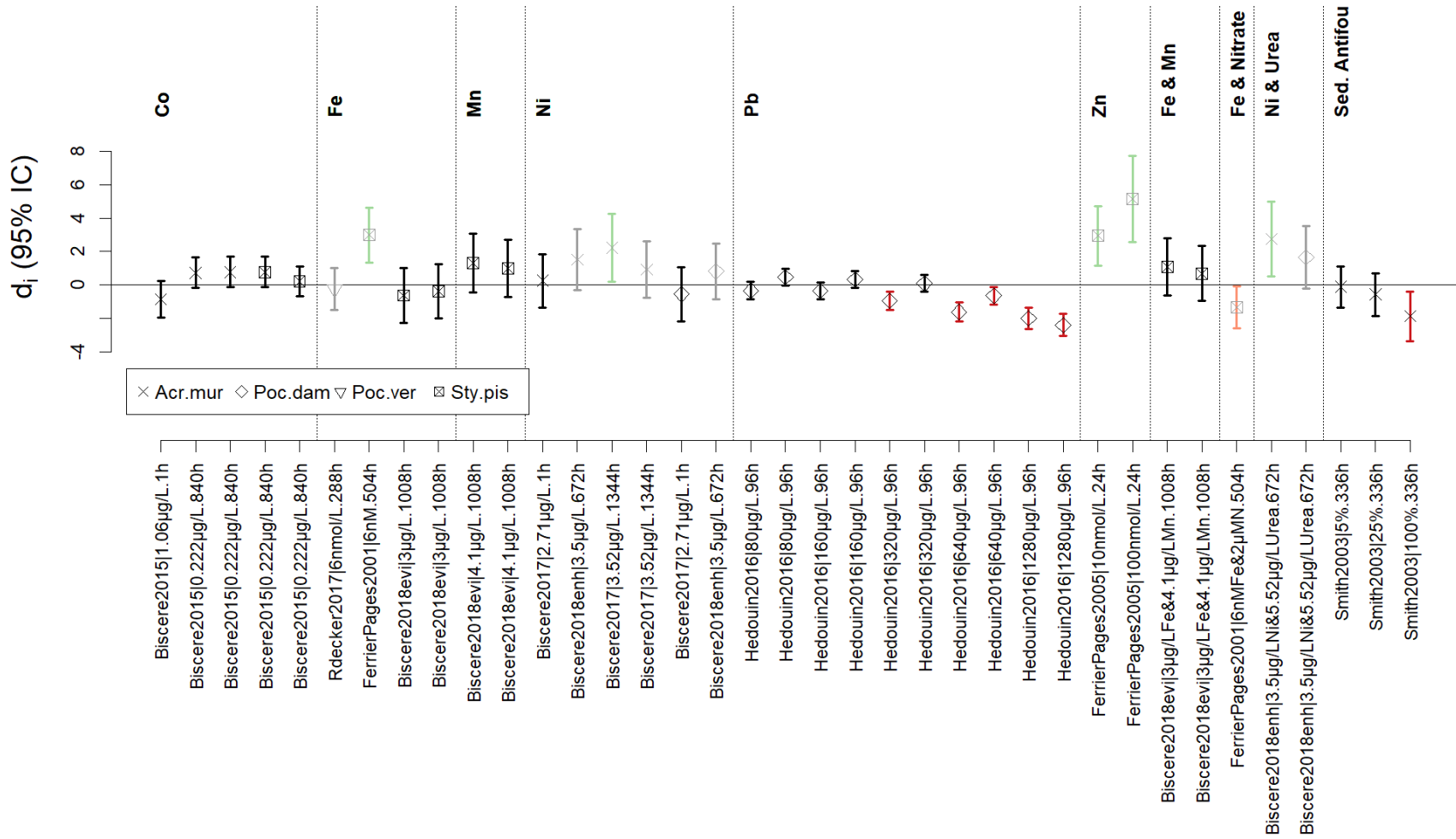


Figure 4.9. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des métaux autres que le cuivre sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 4.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

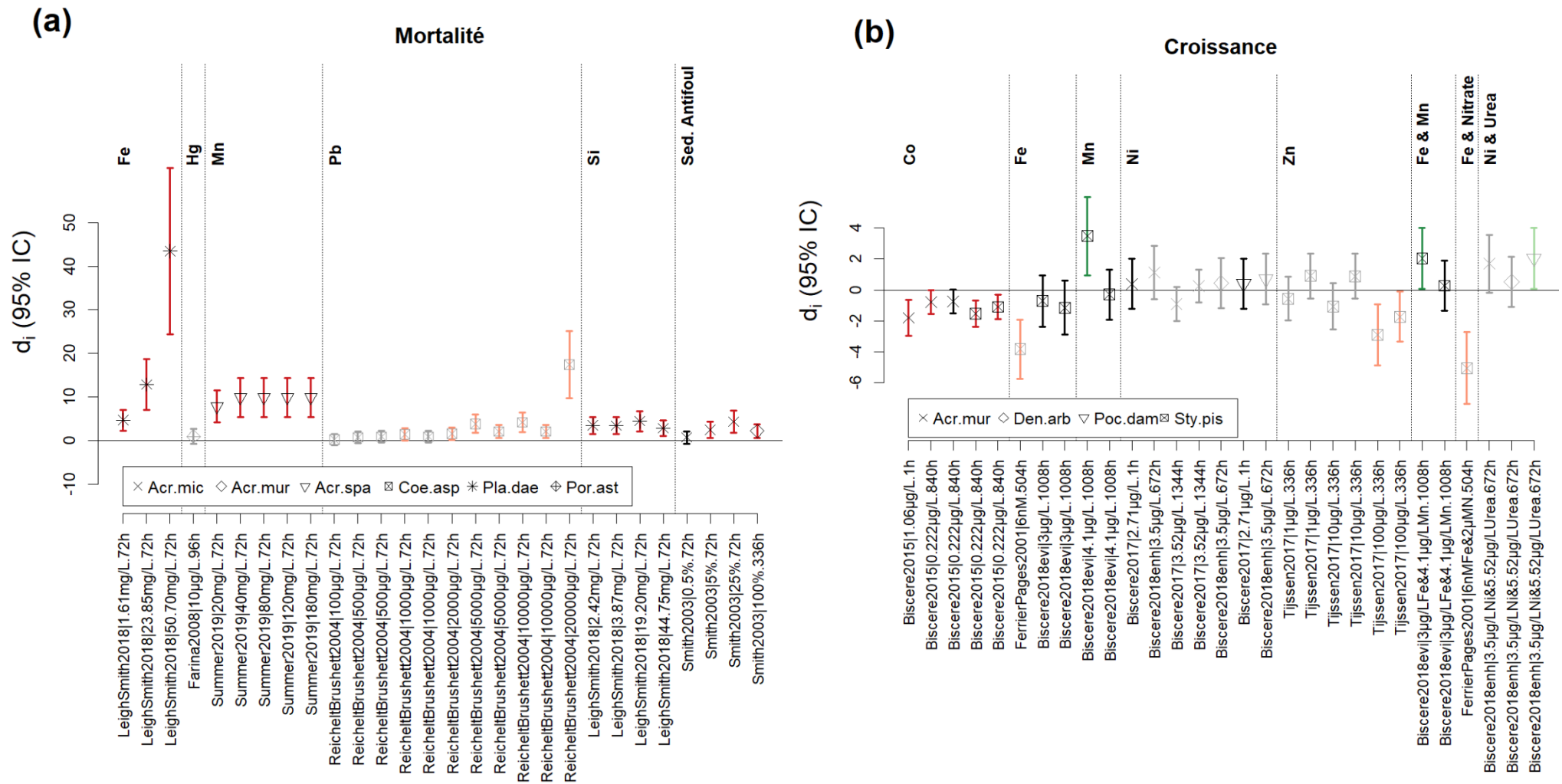


Figure 4.10. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des métaux autres que le cuivre sur (a) la mortalité de coraux aux stades adulte (*Acropora muricata* (Acr.mur)), juvénile (*Acropora microphthalma* (Acr.mic)) et larvaire (toutes les autres espèces, voir le **Tableau 4.2** pour la légende des espèces) et (b) la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 4.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 4.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Seuils de toxicité - Métaux

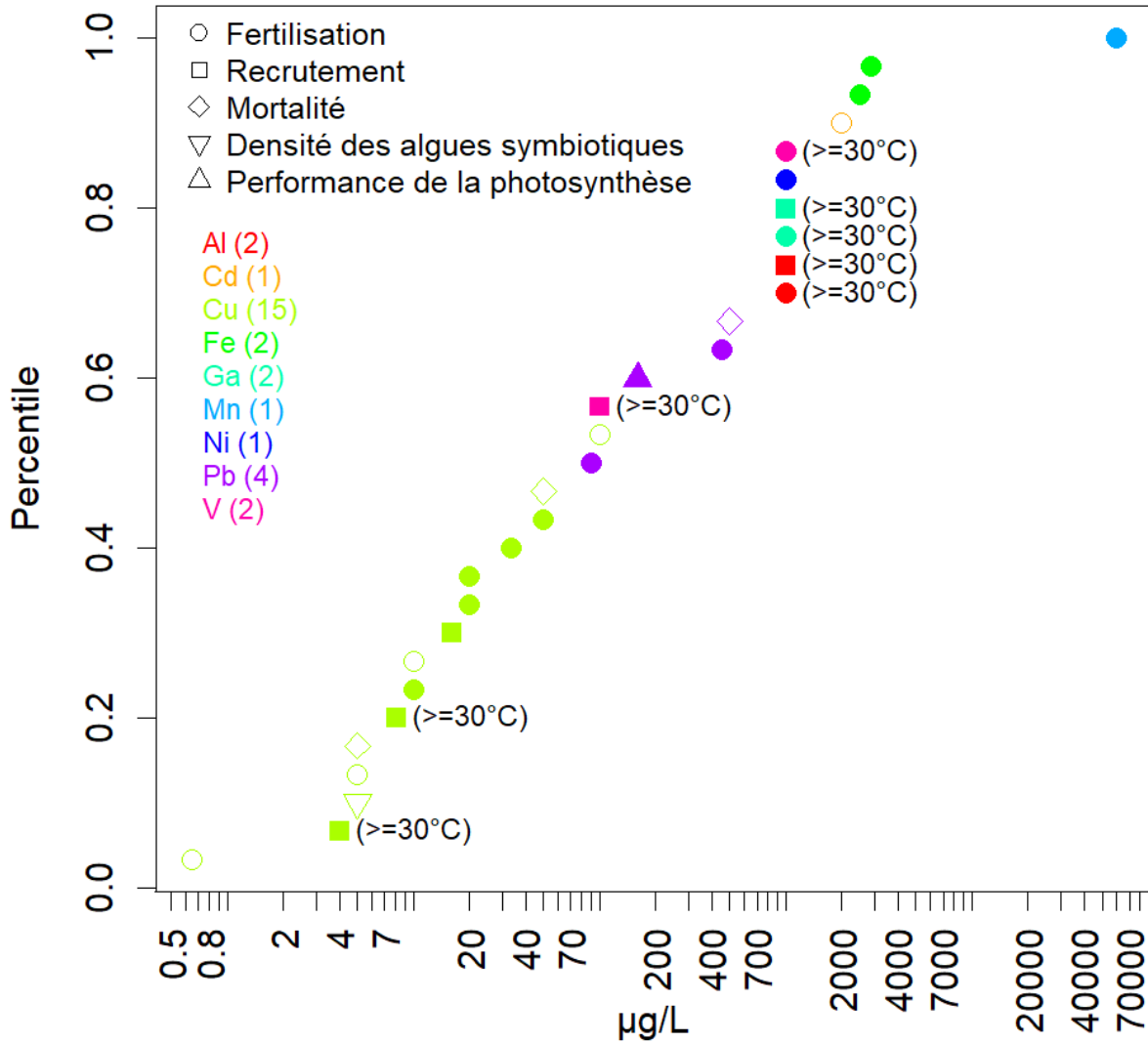


Figure 4.11. Distribution cumulative des concentrations d'exposition des seuils de toxicité (µg/L) déterminés à titre illustratif pour la catégorie des métaux. Les couleurs des points indiquent la substance (le nombre total de seuils étant indiqué entre parenthèses) et la forme des points le type de réponse mesurée. Les seuils basés sur des études présentant un faible risque de biais sont indiqués par des points pleins, et ceux correspondant à des conditions de température élevée ou de faible pH sont indiqués entre parenthèses. Les concentrations d'exposition nominales sont indiquées ici, sauf si seule la concentration effective était disponible.

Chapitre 5 Pesticides

Ce chapitre présente la synthèse quantitative des résultats pour le groupe des **pesticides (herbicides, insecticides, fongicides, biocides)**.

5.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 408 études expérimentales correspondant à 58 documents traitent d'une exposition aux pesticides, mais 4 études ont été exclues car il n'y avait pas de groupe contrôle (3 études) ou parce que les concentrations d'exposition étaient inconnues (1 étude). Pour le groupe des pesticides, la synthèse des résultats est uniquement quantitative et porte sur les résultats relatifs à la **mortalité**, la **croissance**, le **recrutement** et la **fertilisation** des coraux, et à la **densité** et la **photosynthèse** des **algues symbiotiques**. Les 138 études non comprises dans ce périmètre ont donc également été exclues.

5.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **266 études** a montré que :

- **6 études / 2 documents** avaient un niveau de **risque de biais fort** du fait d'une description très insuffisante des méthodes.
- **190 études / 38 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesures des concentrations effectives d'exposition (185 études). Parmi les études qui mesuraient les concentrations effectives d'exposition, 3 études n'étaient pas répliquées et 2 ne donnaient pas d'information sur l'utilisation d'un contrôle solvant.
- **70 études / 12 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.²

5.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 260 études ayant un risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 77 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible, 21 études) ;
- l'exposition était associée à un stress supplémentaire autre que la température ou l'acidification (par ex. une exposition aux UV ou à une baisse de la salinité) (2 études) ;

² Un même article peut inclure des études ayant un risque de biais faible et des études ayant un risque de biais moyen.

- les études étaient des erreurs de metacoding (souvent quand certains outcomes n'étaient pas mesurés pour toutes les espèces d'une expérience, 20 études).

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

5.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse quantitative est basée sur **140 études / 35 documents**, correspondant à **512 cas** de concentration-durée d'exposition (Annexe C). Les 35 documents sont 31 articles de revues scientifiques, un chapitre de livre, un chapitre de thèse de doctorat, un mémoire de master et un rapport. Ils datent de 1994 à 2020. Les 140 études testent l'exposition à 19 pesticides – parmi lesquels le diuron est la substance recueillant le plus de cas (166 cas) suivi de la perméthrin (36 cas), du cyanide (32 cas) et de l'irgarol 1051 (31 cas) – 2 insecticides à base de bactéries et enfin 3 peintures « antifouling » mélangeant des pesticides et des métaux (**Tableau 5.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 22 espèces différentes (**Tableau 5.2**), principalement *Acropora millepora* (232 cas), *Acropora tenuis* (48 cas) et *Pocillopora damicornis* (41 cas). La performance de la photosynthèse des algues symbiotiques est le plus souvent mesurée (139 cas) avec le recrutement (138 cas), puis la densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 84 cas), la fertilisation (73 cas) et la mortalité (68). Relativement peu d'informations sont disponibles pour la croissance (10 cas).

5.5 Synthèse des résultats

Les **35 documents (140 études)** ayant alimenté cette synthèse quantitative sont listés en Annexe C. Les résultats (d_i et intervalle de confiance à 95%) sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Certaines expériences ont testé l'effet d'un pesticide ainsi que l'effet combiné de ce pesticide et d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$). Les résultats sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 5.1 à 5.8** et le **Tableau 5.3** résume l'ensemble des résultats obtenus.

En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition au **2,4-D**, à l'**atrazine**, au **carbaryl**, au **chlorpyrifos**, au **chlorpyrifos oxon**, au **cyanide**, au **cycloheximide**, au **dibrom**, au **dichlorvos**, au **diuron**, à l'**endosulfan**, à l'**hexazinone**, à l'**irgarol 1051**, au **MEMC**, au **monuron**, à la **perméthrin**, au **profenofos**, et à la **tributyltin** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. L'exposition aux produits « antifouling » à base de pesticides et de métaux (cuivre et/ou zinc) a également un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour une exposition au **glyphosate** (blanchissement) et à deux **insecticides à base de bactéries** *Bacillus sp.* (VectoBac G et VectoLex G, recrutement et mortalité) pour les concentrations-durées testées. Pour le glyphosate, cela concerne l'exposition d'une seule espèce à des concentrations nominales de 0.12, 1.2, 6 et 12 mg/L de glyphosate (multiplier par 0.9 pour les concentrations effectives) pendant 110h en combinaison ou non avec un stress de température (à 28 ou 31°C). Les auteurs précisent que les coraux utilisés ont été prélevés dans une zone polluée et pourraient être plus tolérants aux stress.

Certains effets à première vue « positifs » observés peuvent tout d'abord s'expliquer par une absence d'effet (ou peu d'effet) de l'exposition et une forte variabilité naturelle des réponses. Par exemple, le succès de fertilisation est très variable pour les groupes contrôles (de 21 à 99%), entraînant dans certains cas une valeur plus faible dans le groupe contrôle que dans le groupe traité. Les conditions de laboratoire peuvent également se révéler très stressantes pour certaines espèces de coraux et des différences de sensibilité non identifiées entre les individus des groupes contrôle et traité peuvent entraîner ces effets faussement positifs. Ces effets peuvent être clarifiés en répétant les expériences, en évaluant l'état des coraux du groupe contrôle et/ou en augmentant la gamme des concentrations testées. Par exemple, une exposition au diuron à une concentration de 1000 ng/L augmente la croissance du corail *Galaxea fascicularis*, mais une exposition à une concentration de 10000 ng/L la diminue fortement (**Figure 5.8b**).

Certains effets « positifs » peuvent en revanche être réellement induit par l'exposition, mais ils doivent être interprétés avec précaution. Par exemple, une exposition à l'atrazine (12.3 µg/L) augmente la concentration en chlorophylle des tissus d'*Acropora millepora* dans des conditions de température normale (26°C) mais n'a pas d'effet lorsque les températures sont élevées (30-32°C) (**Figure 5.6**). Le même patron est observé pour une exposition à l'hexazinone (3.79 µg/L, mais un effet négatif est observé à 30°C). Les auteurs de l'étude suggèrent que ce phénomène pourrait être un mécanisme de compensation d'une réduction de l'efficacité photosynthétique qui ne serait pas visible en présence de stress thermique.

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 5.1 à 5.8**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. La **Figure 5.9** présente, à titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif qu'il est possible de déterminer pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Ces seuils vont de 4.1 µg/L (chlorothalonil, recrutement) à 333 µg/L (propiconazole, recrutement) lorsque seules les études présentant un faible risque de biais sont prises en compte, et de 1 ng/L (irgarol 1051, recrutement) à 333 µg/L (propiconazole, recrutement) lorsque toutes les études sont prises en compte. Pour les pesticides, la majorité des seuils déterminés proviennent d'études ayant un risque de biais moyen.

Tableau 5.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D)	94-75-7
Atrazine	1912-24-9
Carbaryl	63-25-2
Chlorpyrifos	2921-88-2
Chlorpyrifos oxon (Chl.oxon)	5598-15-2
Cyanide	143-33-9, 151-50-8
Cycloheximide	66-81-9
1,2-dibromo-2,2-dichloroethyl dimethyl phosphate (Dibrom)	300-76-5
Dichlorvos	62-73-7
3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea (Diuron)	330-54-1
Endosulfan	115-29-7
Glyphosate	1071-83-6
Hexazinone	51235-04-2
Irgarol 1051	28159-98-0
2-methoxyethylmercury chloride (MEMC)	123-88-6
Monuron	150-68-5
Permethrin	52645-53-1
Profenofos	41198-08-7
Tributyltin chloride (Tributyltin, TBT)	688-73-3
<hr/>	
VectoBac G (bacterial insecticide)	
VectoLex G (bacterial insecticide)	
<hr/>	
Cu-based antifoulant paints (540-565 g/L cuprous oxide, 40-50g/L diuron) (Cu-Antifoul)	
TBT-based antifoulant paints (20g/L tributyltin oxide, 100-200g/L cuprous oxide) (TBT-Antifoul)	
Sediment contaminated with antifoulant paint containing tributyltin, dibutyltin, monobutyltin, zinc, and copper (Antifoul)	

Tableau 5.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Performance de la photosynthèse	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation	Mortalité	Croissance
<i>Acropora millepora</i> (Acr.mil)	44	93	18	52	25	
<i>Acropora tenuis</i> (Acr.ten)	5	3	16		18	6
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)	15	10	9		7	
<i>Porites astreoides</i> (Por.ast)		12	12		12	
<i>Seriatopora hystrix</i> (Ser.hys)	20		7			
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)	17		1			2
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)	5		11		1	
<i>Plesiastrea versipora</i> (Ple.ver)	8		6			
<i>Porites hawaiiensis</i> (Por.haw)		12				
<i>Acropora microphthalma</i> (Acr.mic)		6			3	
<i>Montipora capitata</i> (Mon.cap)				6	2	
<i>Lobactis scutaria</i> (Lob.scu)				7		
<i>Montipora aequituberculata</i> (Mon.aeq)				7		
<i>Montipora digitata</i> (Mon.dig)	7					
<i>Acropora valida</i> (Acr.val)	2	1	2	1		
<i>Porites cylindrica</i> (Por.cyl)	5					
<i>Acropora digitifera</i> (Acr.dig)	2		2			
<i>Galaxea fascicularis</i> (Gal.fas)	2					2
<i>Madracis auretenra</i> (Mad.aur)	3					
<i>Seriatopora caliendrum</i> (Ser.cal)	3					
<i>Acropora aspera</i> (Acr.asp)	1					
<i>Leptastrea purpurea</i> (Lep.pur)		1				
Total	139	138	84	73	68	10

Tableau 5.3. Résumé des résultats par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées.

Exposition	Performance de la photosynthèse	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation	Mortalité	Croissance	Résumé
2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D)	Oui						Oui
Atrazine	Oui	NS	NS	NS	NS		Oui
Carbaryl	NS	Oui	NS	NS			Oui
Chlorpyrifos	NS	Oui	NS	Oui			Oui
Chlorpyrifos oxon		Oui		NS			Oui
Cyanide	Oui		Oui				Oui
Cycloheximide						Oui	Oui
1,2-dibromo-2,2-dichloroethyl dimethyl phosphate (Dibrom)		NS	NS		Oui		Oui
Dichlorvos			Oui				Oui
3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea (Diuron)	Oui	Oui	Oui	NS	Oui	Oui	Oui
Endosulfan	NS	Oui	Oui	NS			Oui
Glyphosate			NS				NS
Hexazinone	Oui		Oui				Oui
Irgarol 1051	Oui	Oui	Oui				Oui
2-methoxyethylmercury chloride (MEMC)	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui
Monuron	Oui						Oui
Permethrin	NS	Oui	Oui	NS	Oui		Oui
Profenofos	NS	Oui	NS	NS			Oui
Tributyltin chloride (Tributyltin, TBT)	Oui	Oui	NS	Oui		Oui	Oui
VectoBac G (bacterial insecticide)		NS			NS		NS
VectoLex G (bacterial insecticide)		NS			NS		NS
Cu-based antifoulant paints (540-565 g/L cuprous oxide, 40-50g/L diuron) (Cu-Antifoul)		Oui		Oui			Oui
TBT-based antifoulant paints (20g/L tributyltin oxide, 100-200g/L cuprous oxide) (TBT-Antifoul)		Oui		Oui			Oui
Sediment contaminated with antifoulant paint containing tributyltin, dibutyltin, monobutyltin, zinc, and copper (Antifoul)	Oui	Oui	NS		Oui		Oui

Performance de la photosynthèse - Diuron

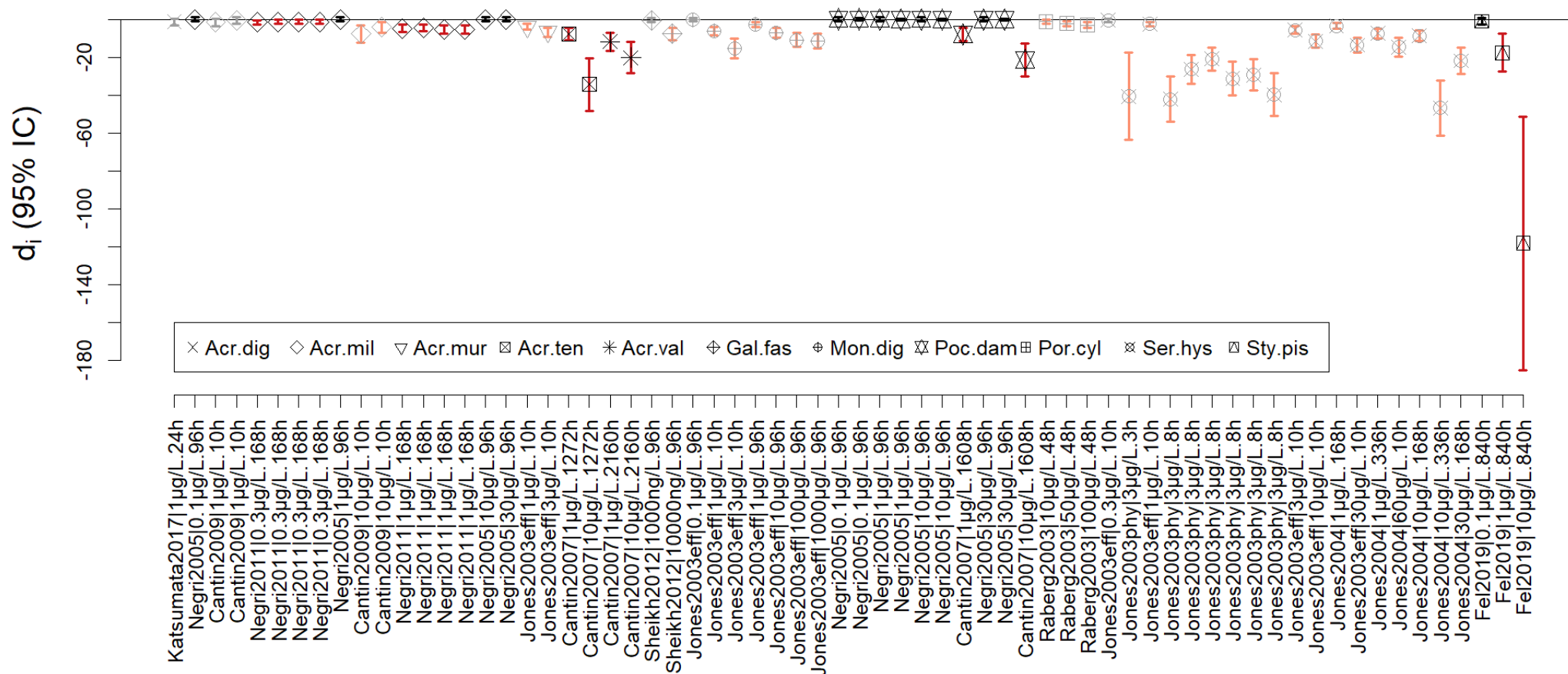


Figure 5.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du diuron sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques. Les valeurs sont ordonnées par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce. Les expositions ont été testées sur des colonies adultes pour toutes les espèces (voir **Tableau 5.2** pour la légende des espèces), et des juvéniles d'*Acropora millepora* (Acr.mil) et *Pocillopora damicornis* (Poc.dam). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

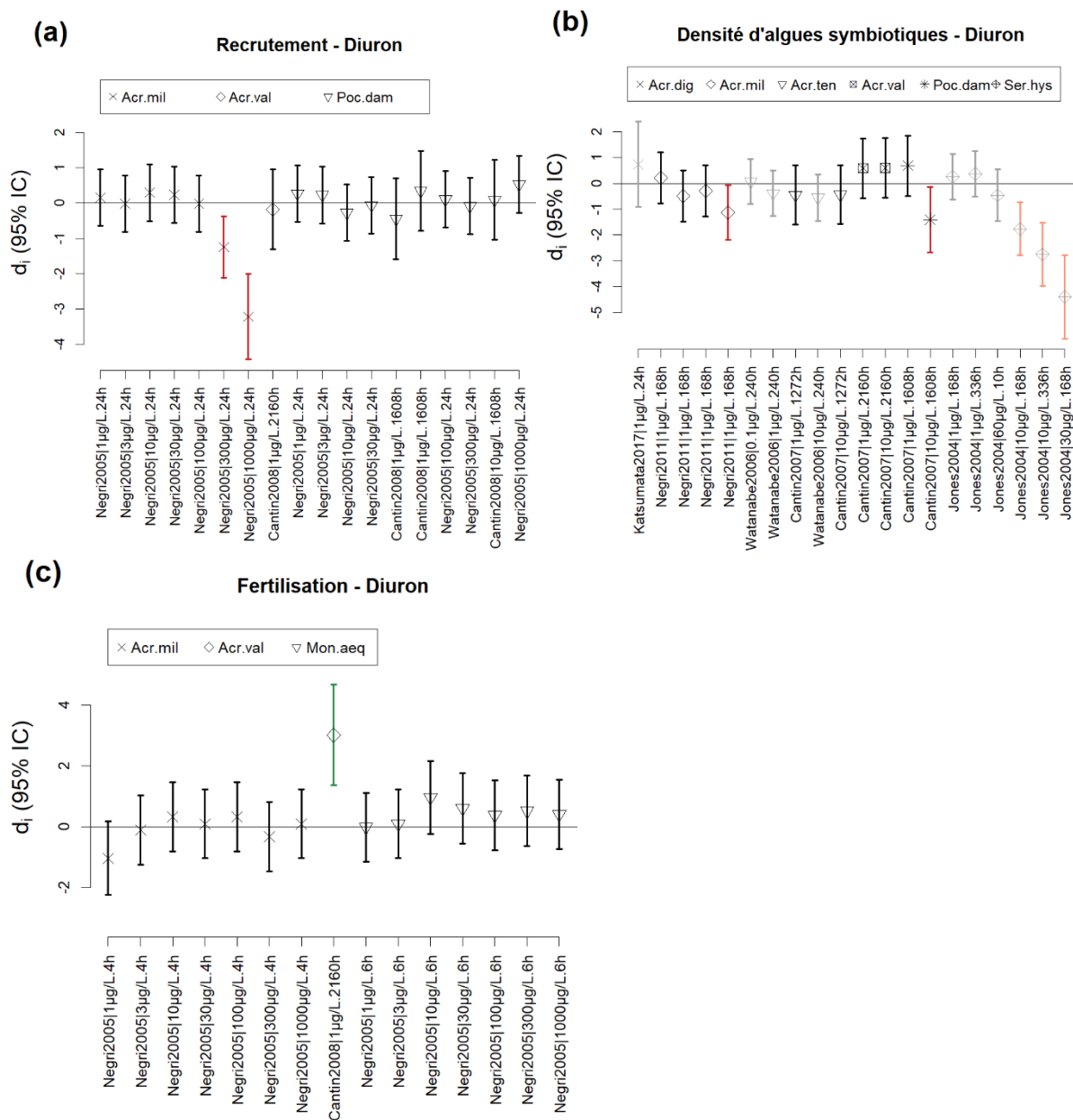


Figure 5.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du diuron sur **(a)** le recrutement, **(b)** la densité algues symbiotiques et **(c)** la fertilisation des coraux. Les valeurs sont ordonnées par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Mortalité - Diuron

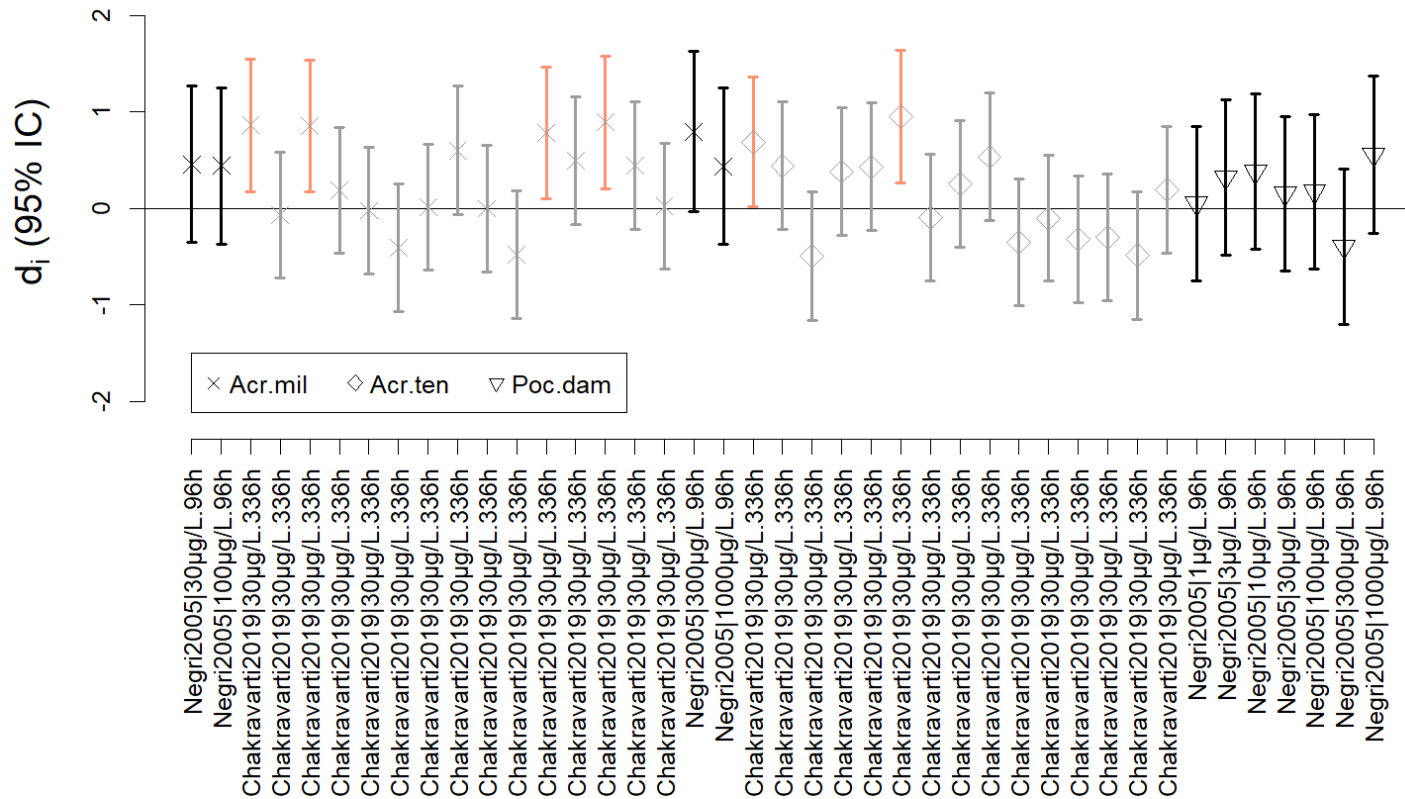


Figure 5.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet du diuron sur la mortalité des larves ou juvéniles des coraux . Les valeurs sont ordonnées par espèce et concentration x durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Performance de la photosynthèse

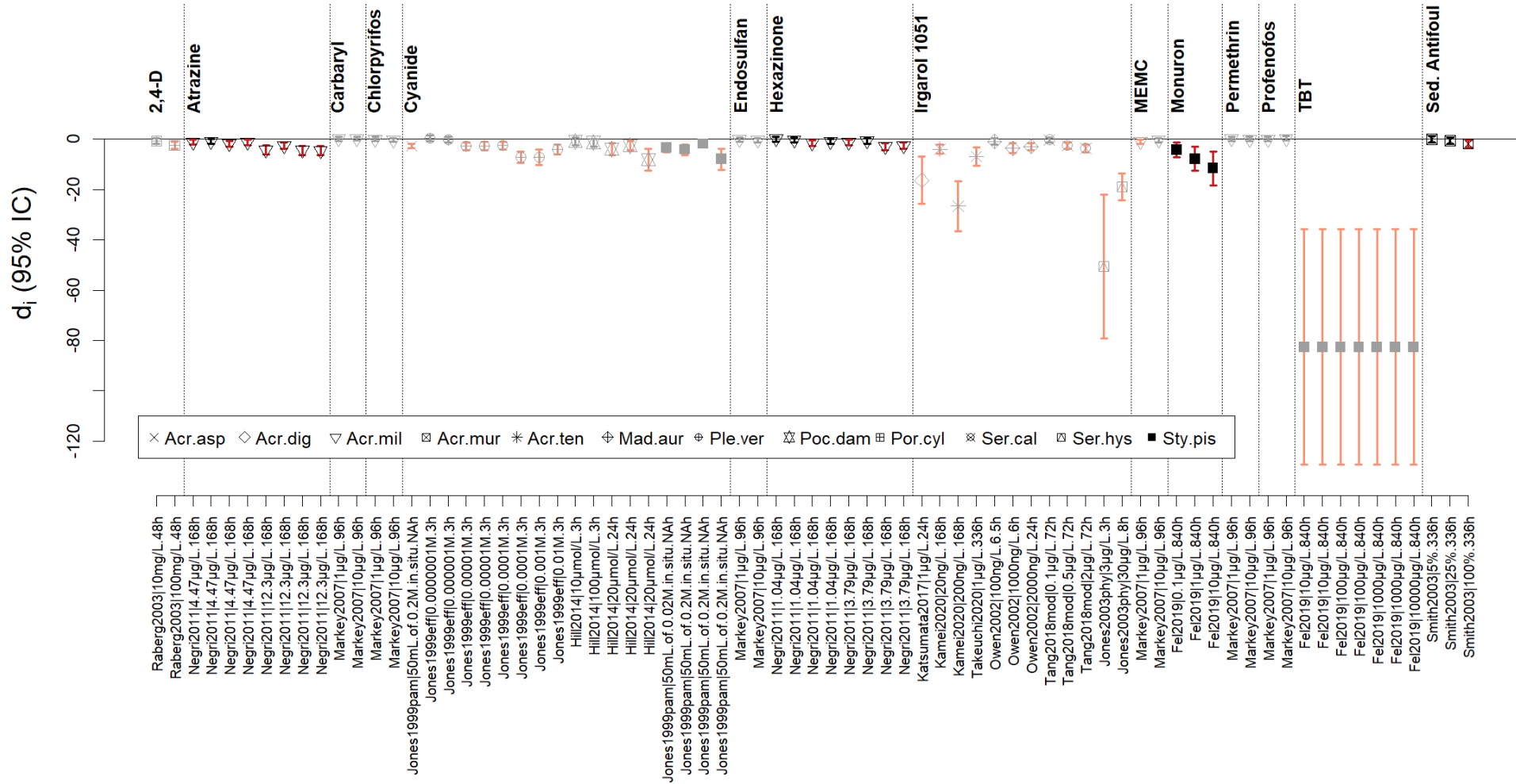


Figure 5.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pesticides autres que le diuron sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 5.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition. Les expositions ont été testées sur des colonies adultes pour toutes les espèces (voir **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Recrutement

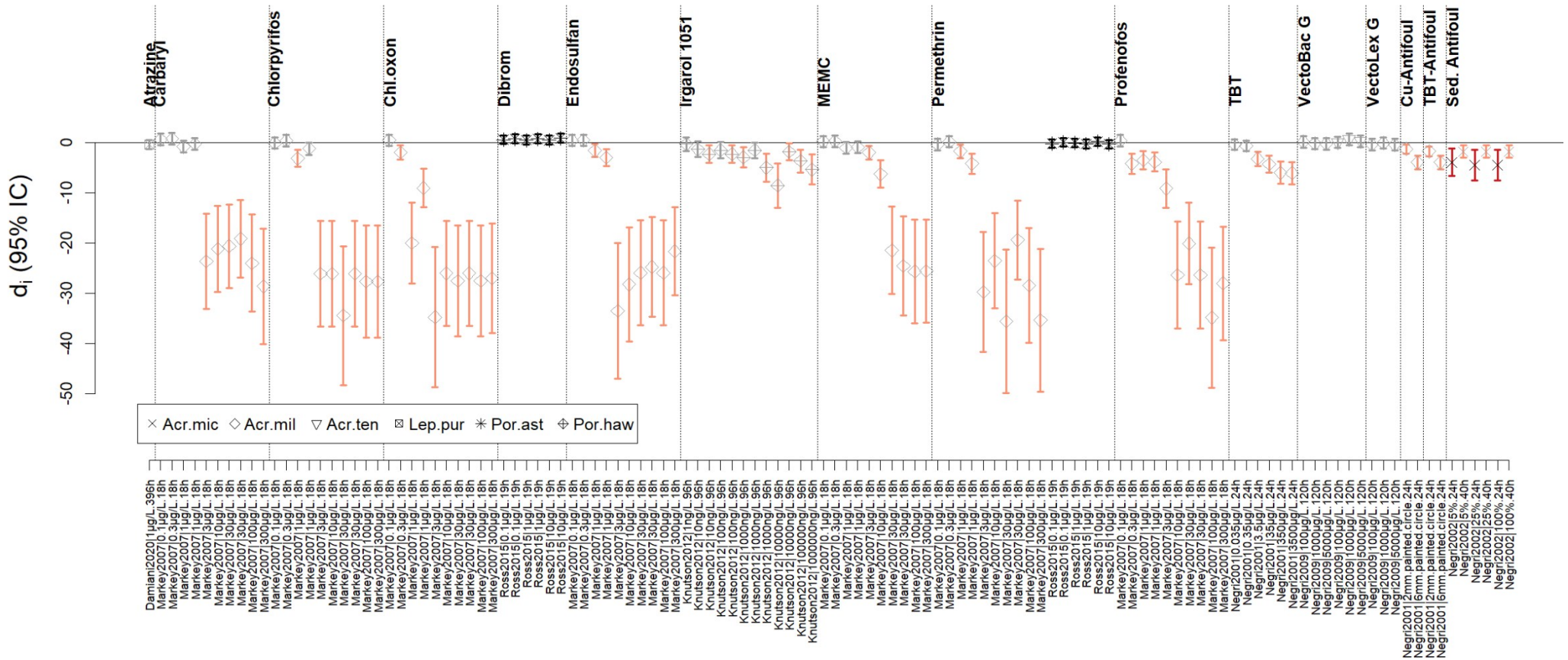


Figure 5.5. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pesticides autres que le diuron sur le recrutement des coeurs. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 5.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

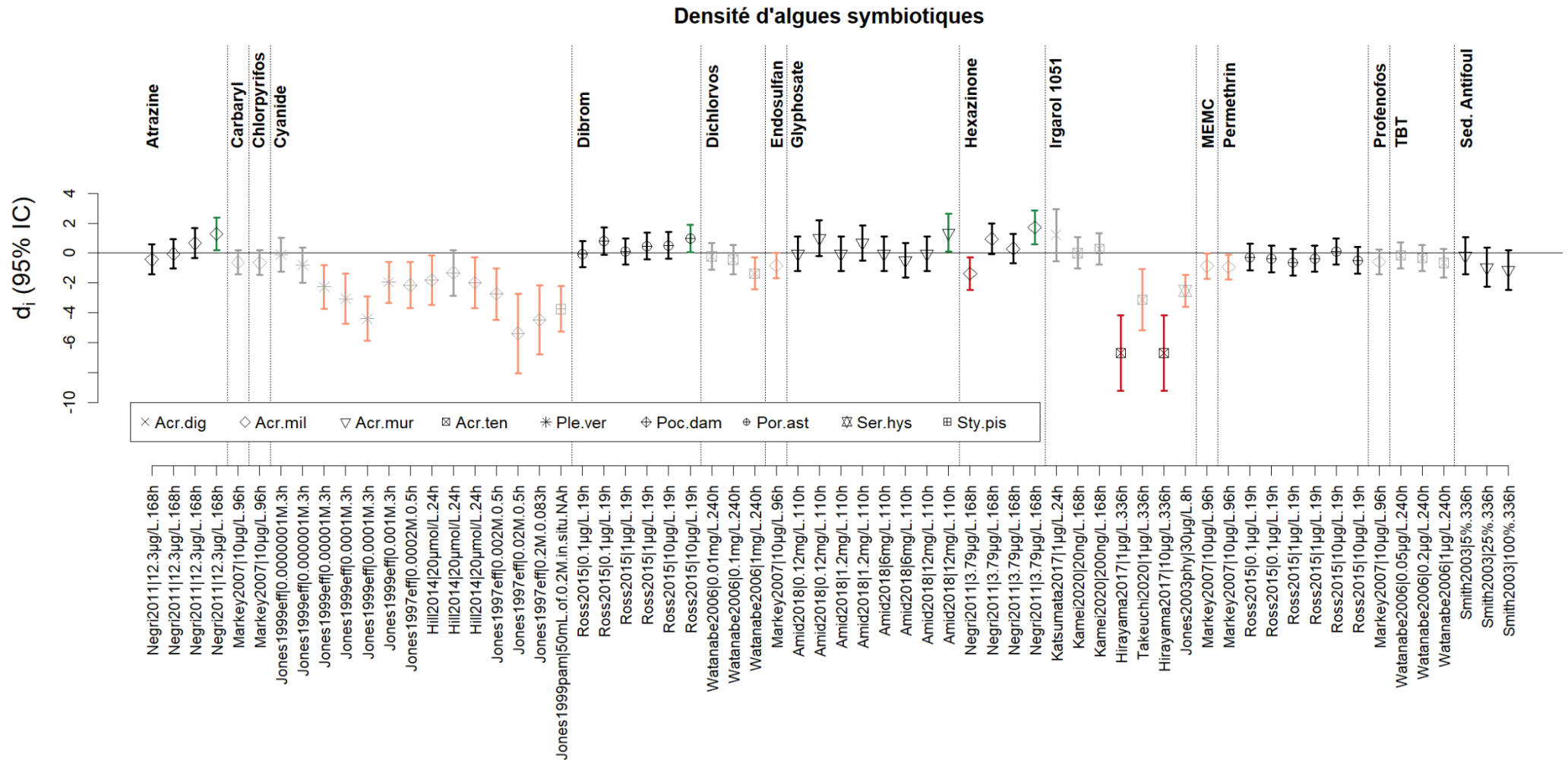


Figure 5.6. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pesticides autres que le diuron sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 5.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

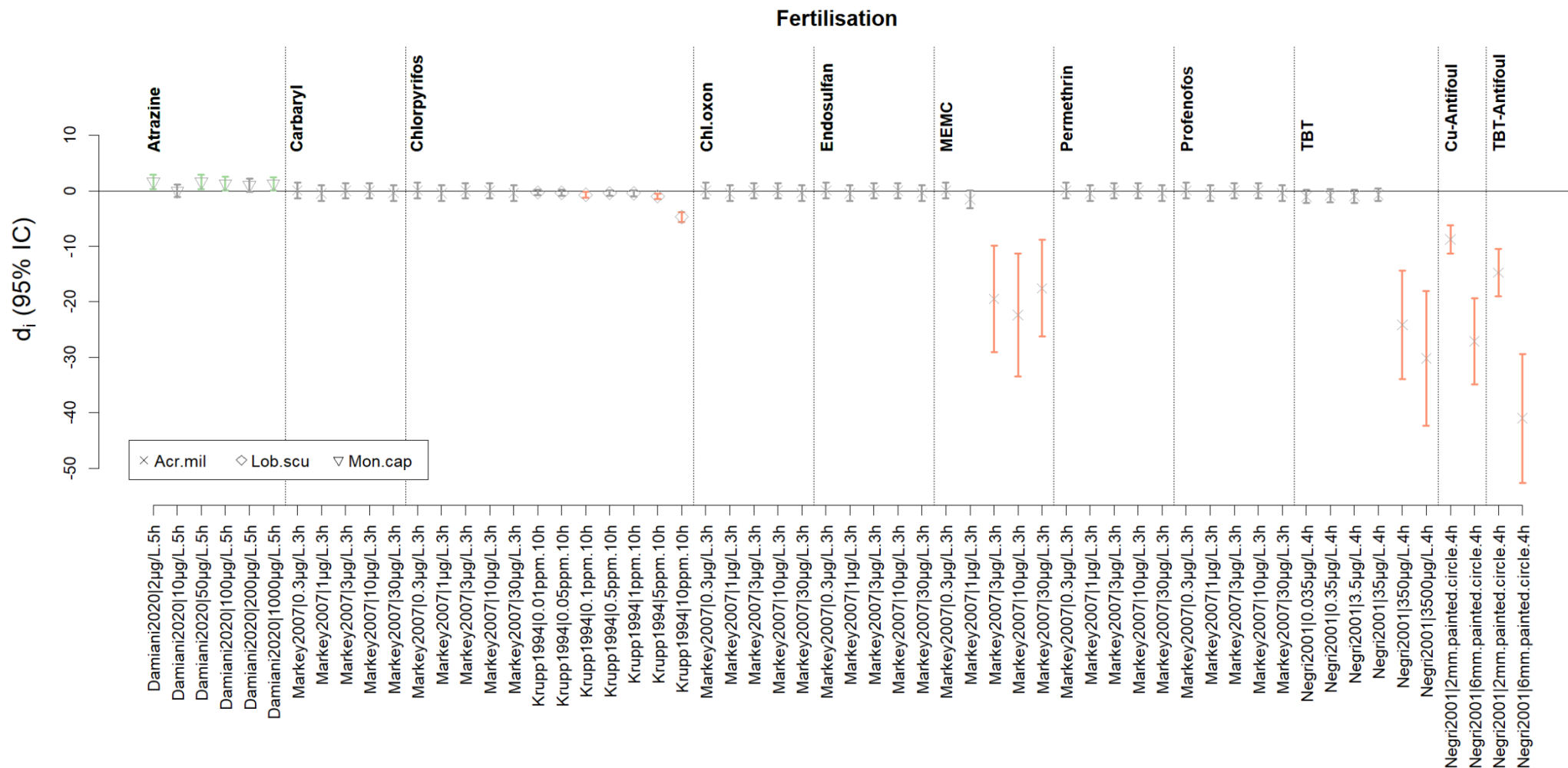


Figure 5.7. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pesticides autres que le diuron sur la fertilisation des coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 5.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

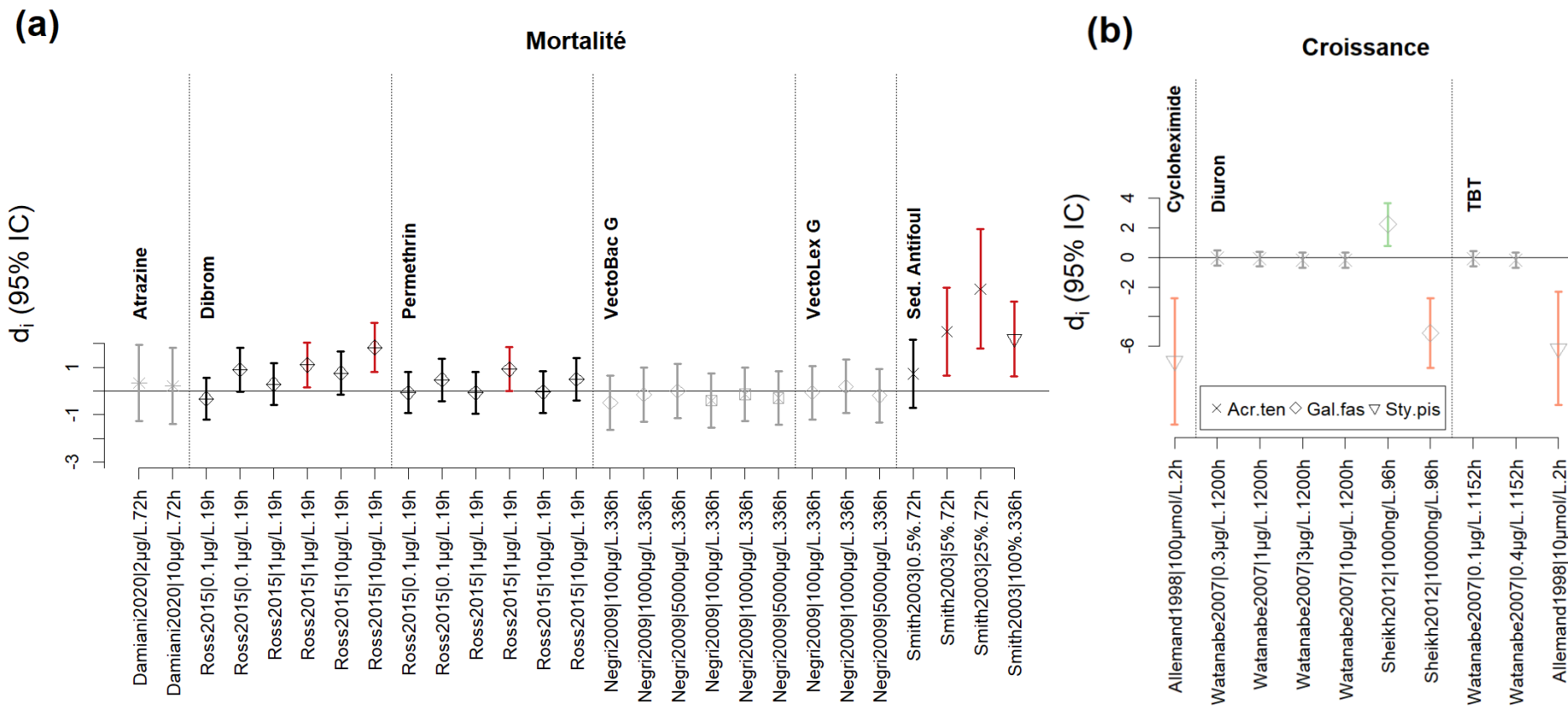


Figure 5.8. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour **(a)** l'effet des pesticides autres que le diuron sur la mortalité des coraux et **(b)** l'effet du diuron, de la tributyltin et du cycloheximide sur la croissance de coraux adultes (Allemand et al. 1998, Sheikh et al. 2012) et juvéniles (Watanabe et al. 2007). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 5.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque exposition (voir le **Tableau 5.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Seuils de toxicité - Pesticides

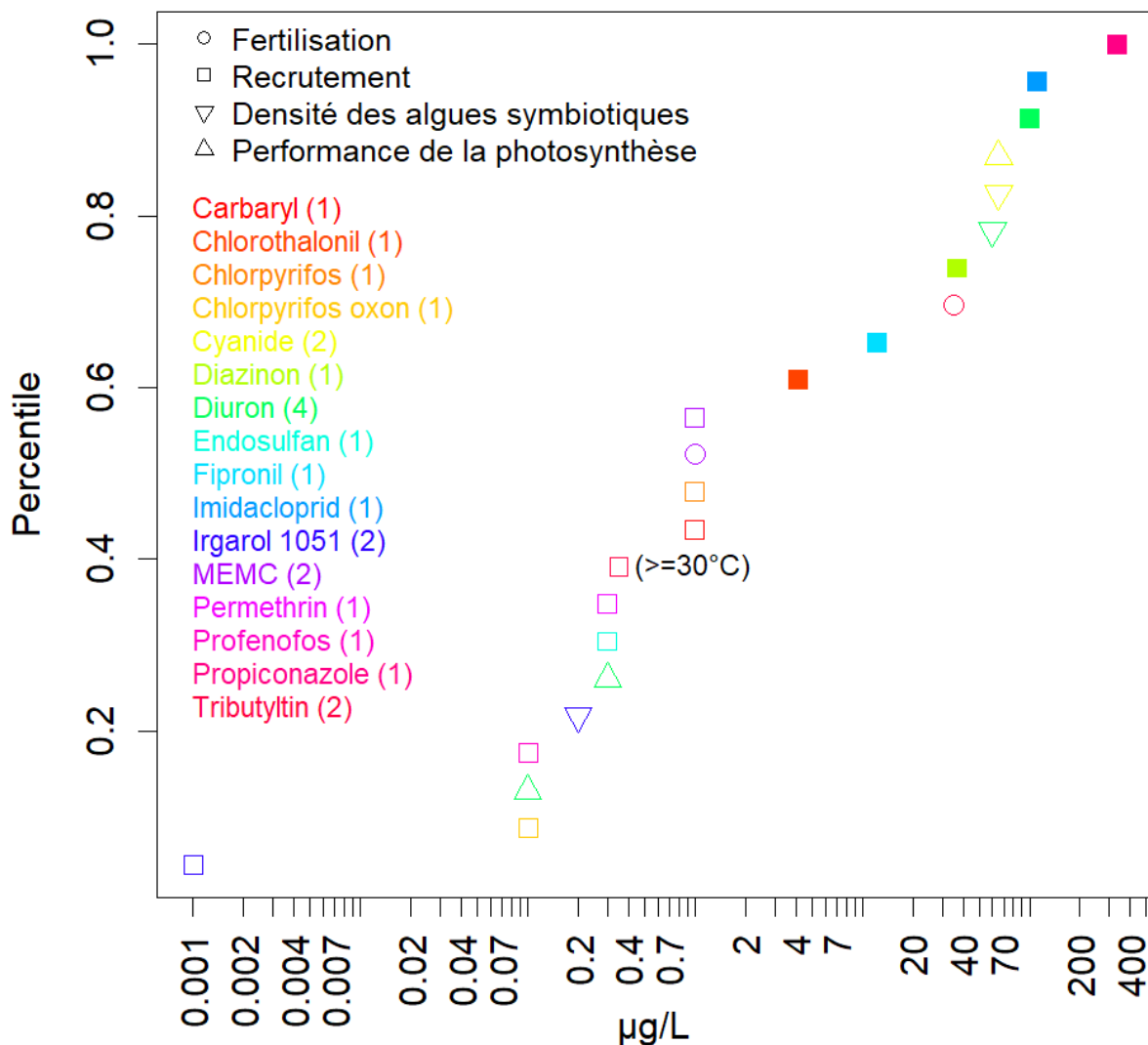


Figure 5.9. Distribution cumulative des concentrations d'exposition des seuils de toxicité ($\mu\text{g/L}$) déterminés à titre illustratif pour la catégorie des pesticides. Les couleurs des points indiquent la substance (le nombre total de seuils étant indiqué entre parenthèses) et la forme des points le type de réponse mesurée. Les seuils basés sur des études présentant un faible risque de biais sont indiqués par des points pleins, et ceux correspondant à des conditions de température élevée ou de faible pH sont indiqués entre parenthèses. Les concentrations d'exposition nominales sont indiquées ici.

Chapitre 6 Hydrocarbures

Ce chapitre présente la synthèse quantitative des résultats pour le groupe des **hydrocarbures**.

6.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 566 études expérimentales correspondant à 67 documents traitent d'une exposition aux hydrocarbures, mais 34 études ont été exclues car il n'y avait pas de groupe contrôle (4 études), parce que les concentrations d'exposition étaient inconnues (29 études), ou encore parce que l'exposition était combinée à une exposition à des macroparticules (1 étude). Pour le groupe des hydrocarbures, la synthèse des résultats est uniquement quantitative et porte sur les résultats relatifs à la **mortalité**, la **croissance**, le **recrutement** et la **fertilisation** des coraux, et à la **densité** et la **photosynthèse** des **algues symbiotiques**. Les 221 études non comprises dans ce périmètre ont donc également été exclues.

6.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **311 études** a montré que :

- **85 études / 8 documents** avaient un niveau de **risque de biais fort** parce qu'il y avait des différences avérées ou potentielles au départ entre les groupes contrôle et traité (84 études) ou parce que les groupes contrôle ont potentiellement été également exposés aux hydrocarbures (1 étude).
- **91 études / 19 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesures des concentrations effectives d'exposition (71 études). Les études qui mesuraient les concentrations effectives d'exposition n'étaient pas répliquées (20 études).
- **135 études / 20 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.³

6.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 226 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 43 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible pour 2 études, ou les données étaient déjà présentées dans un autre article pour 18 études) ;

³ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

- une exposition aux hydrocarbures associée à un stress supplémentaire autre que la température ou l'acidification (par ex. une exposition aux UV ou à une baisse de la salinité) était testée (14 études).

Enfin, pour 7 études, les données ont été extraites mais il n'a pas été possible de calculer une différence de moyennes standardisée d_i car $S_{commune_i}$ était nulle.

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

6.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse quantitative est basée sur **142 études / 30 documents**, correspondant à **640 cas** de concentration-durée d'exposition (Annexe C). Les 30 documents sont 24 articles de revues scientifiques, une thèse de doctorat, deux thèses de master, un rapport et deux actes de colloque. Ils datent de 1979 à 2020. Les 142 études testent l'exposition à 8 hydrocarbures – le 1-Méthyl-naphtalène étant la substance recueillant le plus de cas (80 cas) ; à 6 différents types d'huile – le pétrole brut étant l'huile la plus étudiée (« *crude oil* », 106 cas) ; à du condensat de gaz ; et à de l'eau de production de pétrole (**Tableau 6.1**). Des expositions à un mélange de pétrole ou de fioul avec des produits dispersants sont aussi testées, ainsi qu'une exposition à du lixiviat de charbon (mélange d'hydrocarbures et de métaux). Les expérimentations ont été réalisées sur 25 espèces différentes (**Tableau 6.2**), principalement *Acropora tenuis* (105 cas) et *Pocillopora damicornis* (86 cas). La mortalité est le plus souvent mesurée (175 cas) avec le recrutement (148 cas) et la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (133 cas), puis la croissance (104 cas), la densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 41 cas) et la fertilisation (39 cas).

6.5 Synthèse des résultats

Les **30 documents (142 études)** ayant alimenté cette synthèse quantitative sont listés en Annexe C. Les résultats (d_i et intervalle de confiance à 95%) sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Certaines expériences ont testé l'effet d'une exposition aux hydrocarbures ainsi que l'effet combiné des hydrocarbures et d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$), ou certaines expériences étaient réalisées dans des conditions légèrement acides pour les coraux (pH = 7.98). Les résultats sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 6.1 à 6.6** et le **Tableau 6.3** résume l'ensemble des résultats obtenus.

En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à l'**anthracène**, au **benzène**, au **benzopyrène**, au **méthyl-naphtalène**, au **naphtalène**, au **phénanthrène**, au **p-xylène**, au **toluène**, au **pétrole brut**, au **diésel**, au **fioul**, à l'**essence**, à une **huile lubrifiante minérale** ou **végétale**, à du **condensats de gaz**, ou de l'**eau de production de pétrole** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. Les expositions à du pétrole brut (ou du fioul) combiné à des dispersants de produits pétroliers ont également entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées, excepté pour le mélange avec le dispersant BP1100WD (pas d'effet sur la croissance du squelette, une seule espèce testée *Pseudodiploria strigosa*).

Certains effets à première vue « positifs » observés peuvent tout d'abord s'expliquer par une absence d'effet (ou peu d'effet) de l'exposition et une forte variabilité naturelle des réponses (par exemple du succès de recrutement), entraînant dans certains cas une valeur plus faible dans le groupe contrôle que dans le groupe traité. Les conditions de laboratoire peuvent également se révéler très stressantes pour certaines espèces de coraux et des différences de sensibilité non identifiées entre les individus des groupes contrôle et traité peuvent entraîner ces effets faussement positifs. Ces effets peuvent être clarifiés en répétant les expériences, en évaluant l'état des coraux du groupe contrôle et/ou en augmentant la gamme des concentrations testées. Par exemple, une exposition à 3.9 mg/L de pétrole brut (*crude oil*) augmente la densité d'algues symbiotiques du corail *Pocillopora damicornis*, mais une exposition à des concentrations plus élevées (31.3-250 mg/L) la diminue fortement (**Figure 5.8****Figure 6.5**).

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 6.1 à 6.6**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. La **Figure 6.7** présente, à titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif qu'il est possible de déterminer pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Ces seuils vont de 0.6 µg/L (huile lubrifiante végétale, fertilisation) à 34.238 mg/L (benzène, recrutement) lorsque seules les études présentant un faible risque de biais sont prises en compte, et de 0.165 µg/L (pétrole brut, fertilisation) à 34.238 mg/L (benzène, recrutement) lorsque toutes les études sont prises en compte.

Tableau 6.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
Anthracene (Ant.)	120-12-7
Benzene (Benzene)	71-43-2
Benzo(a)pyrene (Benzop.)	50-32-8
1-Methylnaphthalene (Met.)	90-12-0
Naphtalene (Naph.)	91-20-3
Phenanthrene (Phe.)	85-01-8
P-Xylene (PXyl.)	106-42-3
Toluene (Tol.)	108-88-3
<hr/>	
Crude oil (e.g. Prudhoe Bay, Macondo, Arabian, Egyptian, Iranian, or Louisiana crude oil) (Crude oil)	
Diesel (Diesel)	
Fuel oil (Fuel)	
Gasoline (Gasoline)	
Mineral Derived Lubricant Oil (Mineral lubr.)	
Vegetal Derived Lubricant Oil (Vegetal lubr.)	
<hr/>	
Gas condensate (Gas)	
<hr/>	
Production formation water (Prod. water)	
<hr/>	
Crude oil & BioreicoR93 (Oil & BR93)	
Crude oil & Biosolve (Oil & B)	
Crude oil & BP1100WD (Oil & BP)	
Crude oil & Corexit9500 (Oil & C9500)	
Crude oil & Corexit9527 (Oil & C9527)	
Crude oil & Dispolen36S (Oil & D36S)	
Crude oil & EmulgalC100 (Oil & EC100)	
Crude oil & Inipol90 (Oil & I90)	
Crude oil & PetrotechPTI25 (Oil & PTI25)	
Crude oil & SlickgoneNS (Oil & SNS)	
Fuel oil & Ardrex6120 (Fuel & A6120)	
Coal leachate (Coal leach.)	

Tableau 6.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Mortalité	Recrutement	Performance de la photosynthèse	Croissance	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation
<i>Acropora tenuis</i> (Acr.ten)	18	81				6
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)	56	10	11		9	
<i>Porites astreoides</i> (Por.ast)	12	6	21	21		
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)	47	8				
<i>Acropora millepora</i> (Acr.mil)		24				21
<i>Acropora cervicornis</i> (Acr.cer)	5		17	17		
<i>Siderastrea siderea</i> (Sid.sid)	5		18	12		
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)			16		18	
<i>Stephanocoenia intersepta</i> (Ste.int)	2		13	13		
<i>Orbicella faveolata</i> (Orb.fav)	13	7			4	
<i>Porites divaricata</i> (Por.div)	3		11	9		
<i>Pseudodiploria strigosa</i> (Pse.stri)			2	21		
<i>Plesiastrea versipora</i> (Ple.ver)			13		8	
<i>Solenastrea bournoni</i> (Sol.bou)	4		8	7		
<i>Acropora microphthalma</i> (Acr.mic)						12
<i>Seriatopora hystrix</i> (Ser.hys)	4	4				
<i>Seriatopora guttata</i> (Ser.gut)	2	4				
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Poc.ver)		3	2			
<i>Acropora nasuta</i> (Acr.nas)					2	
<i>Agaricia humilis</i> (Aga.hum)	1	1				
<i>Agaricia tenuifolia</i> (Aga.ten)				2		
<i>Platygyra sinensis</i> (Pla.sin)	2					
<i>Porites porites</i> (Por.por)				2		
<i>Coelastrea aspera</i> (Coe.asp)	1					
<i>Mussismilia harttii</i> (Mus.har)			1			
Total	175	148	133	104	41	39

Tableau 6.3. Résumé des résultats par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées.

Exposition	Mortalité	Recrutement	Performance de la photosynthèse	Croissance	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation	Résumé
Anthracene (Ant.)	Oui	Oui					Oui
Benzene (Benzene)		Oui					Oui
Benzo(a)pyrene (Benzop.)	Oui				Oui		Oui
1-Methylnaphthalene (Met.)	Oui		Oui	Oui			Oui
Naphtalene (Naph.)		Oui					Oui
Phenanthrene (Phe.)	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui
P-Xylene (PXyl.)		Oui					Oui
Toluene (Tol.)	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui
Crude oil (e.g. Prudhoe Bay, Macondo, Arabian, Egyptian, Iranian, or Louisiana crude oil) (Crude oil)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Diesel (Diesel)		NS	Oui				Oui
Fuel oil (Fuel)	Oui	Oui	Oui				Oui
Gasoline (Gasoline)		Oui					Oui
Mineral Derived Lubricant Oil (Mineral lubr.)			Oui		Oui	Oui	Oui
Vegetal Derived Lubricant Oil (Vegetal lubr.)			Oui		Oui	Oui	Oui
Gas condensate (Gas)	Oui	Oui					Oui
Production formation water (Prod. water)		Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Crude oil & BioreicoR93 (Oil & BR93)	Oui						Oui
Crude oil & Biosolve (Oil & B)	Oui						Oui
Crude oil & BP1100WD (Oil & BP)				NS			NS
Crude oil & Corexit9500 (Oil & C9500)	Oui	Oui	Oui	Oui			Oui
Crude oil & Corexit9527 (Oil & C9527)		Oui	Oui	Oui		Oui	Oui
Crude oil & Dispolen36S (Oil & D36S)	Oui						Oui
Crude oil & EmulgalC100 (Oil & EC100)	Oui						Oui
Crude oil & Inipol90 (Oil & I90)	Oui						Oui
Crude oil & PetrotechPTI25 (Oil & PTI25)	Oui						Oui
Crude oil & SlickgoneNS (Oil & SNS)	Oui						Oui
Fuel oil & Ardrex6120 (Fuel & A6120)	Oui						Oui
Coal leachate (Coal leach.)		Oui				Oui	Oui

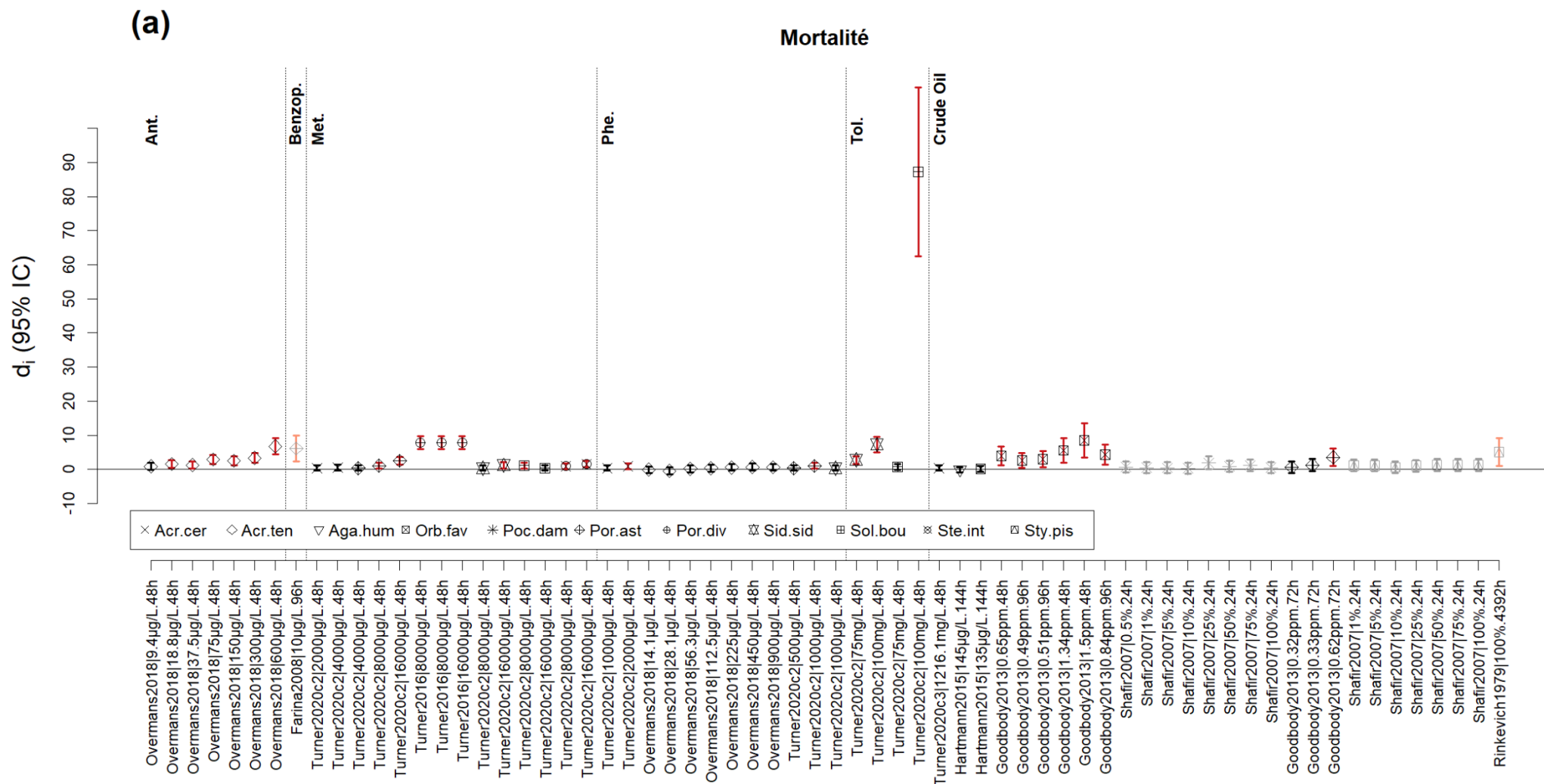


Figure 6.1a. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la mortalité de coraux aux stades larvaire et adulte. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

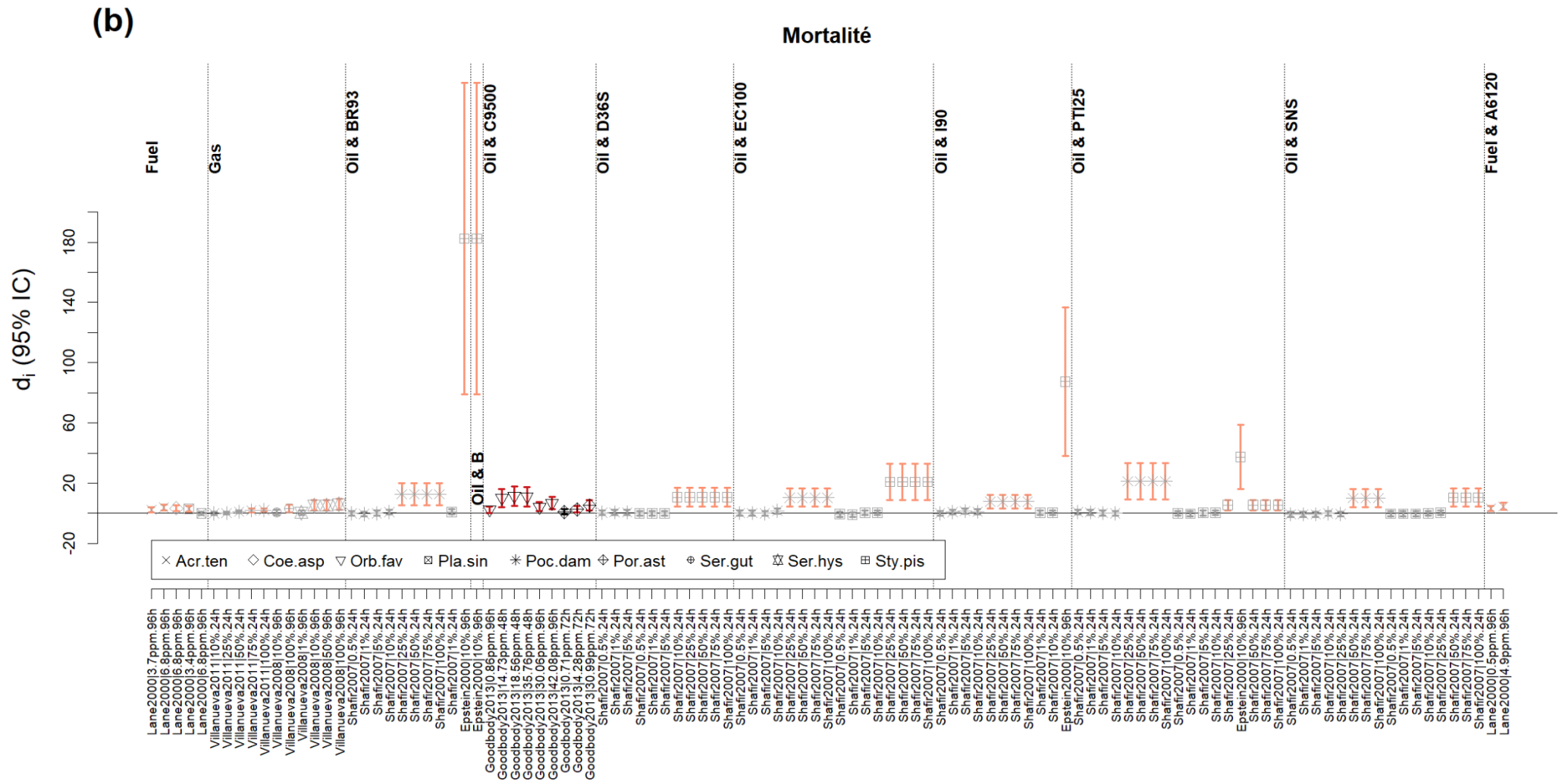


Figure 6.1b. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la mortalité de coraux aux stades larvaire et adulte. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

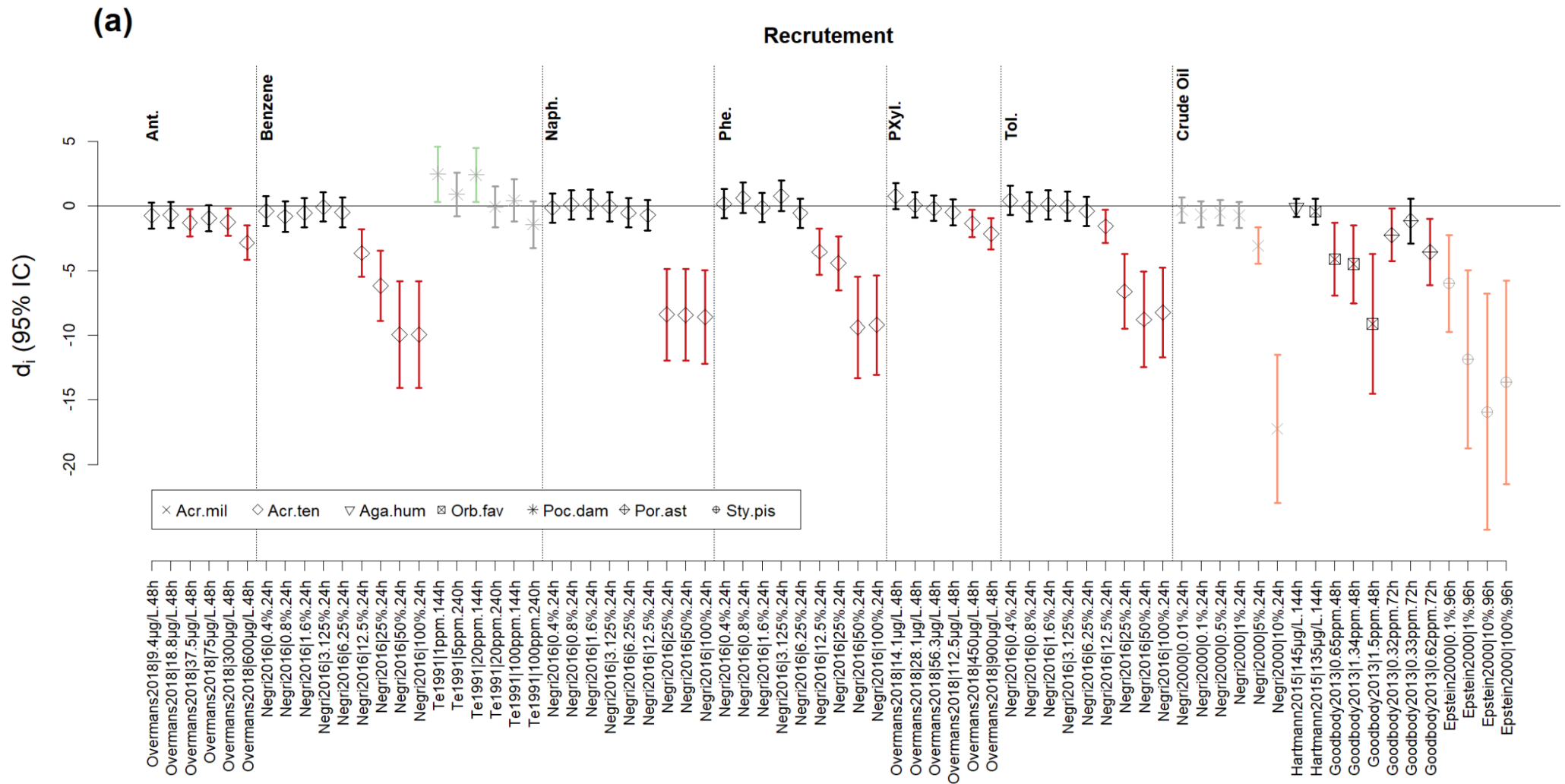


Figure 6.2a. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur le succès du recrutement des larves de corail. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

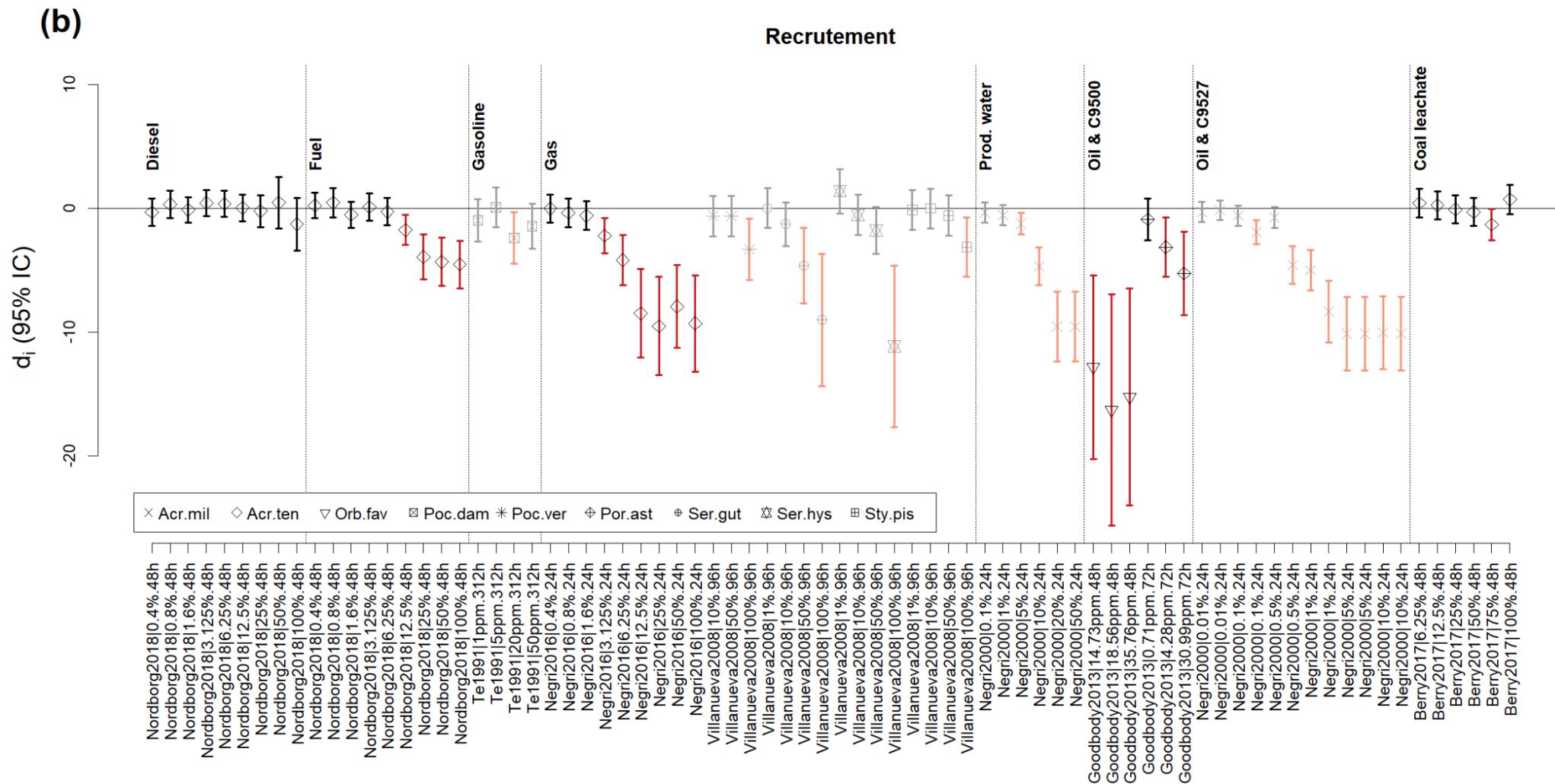


Figure 6.2b. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur le succès du recrutement des larves de corail. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

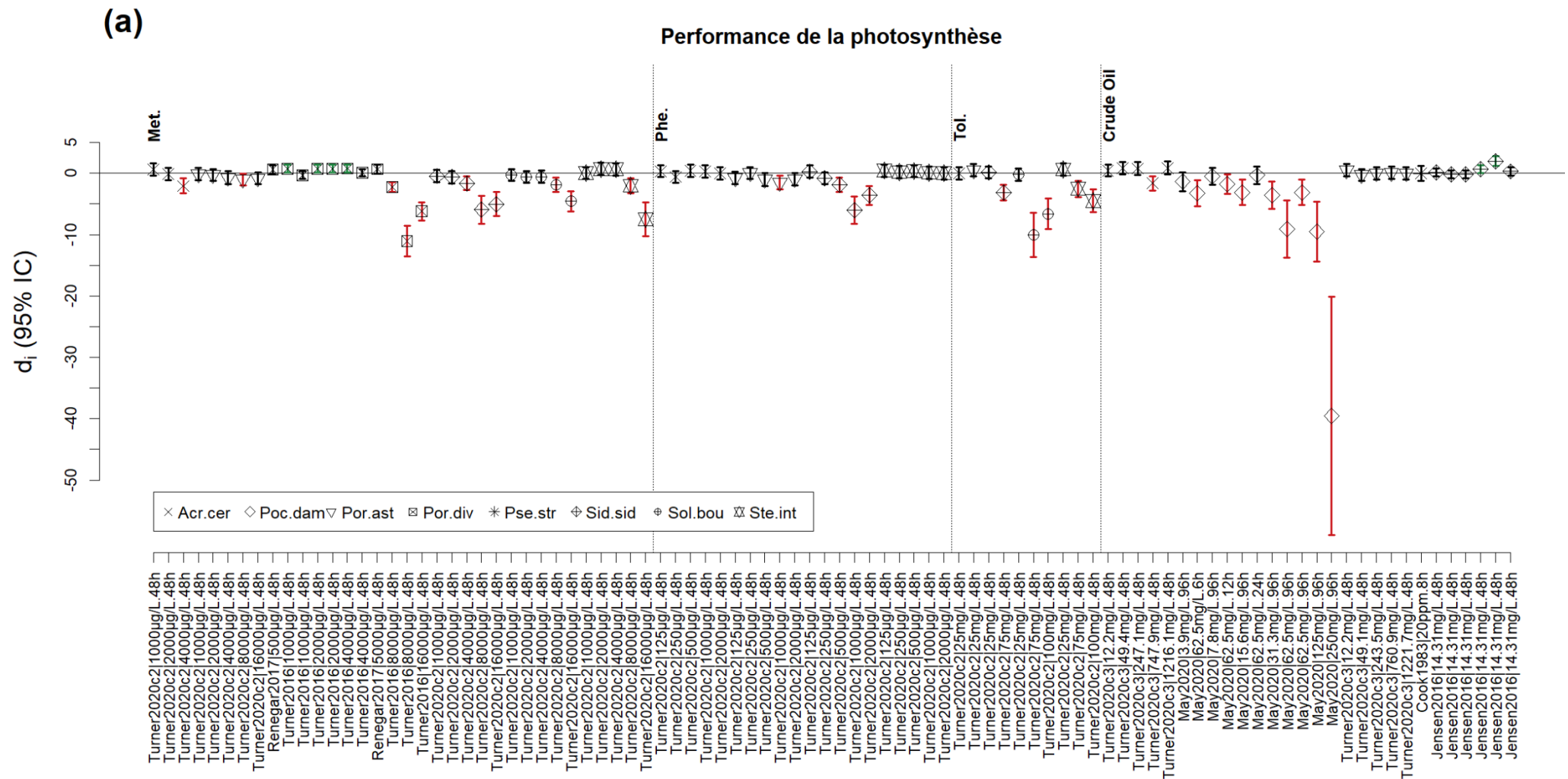


Figure 6.3a. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. L'intervalle de confiance vert indique une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

(b)

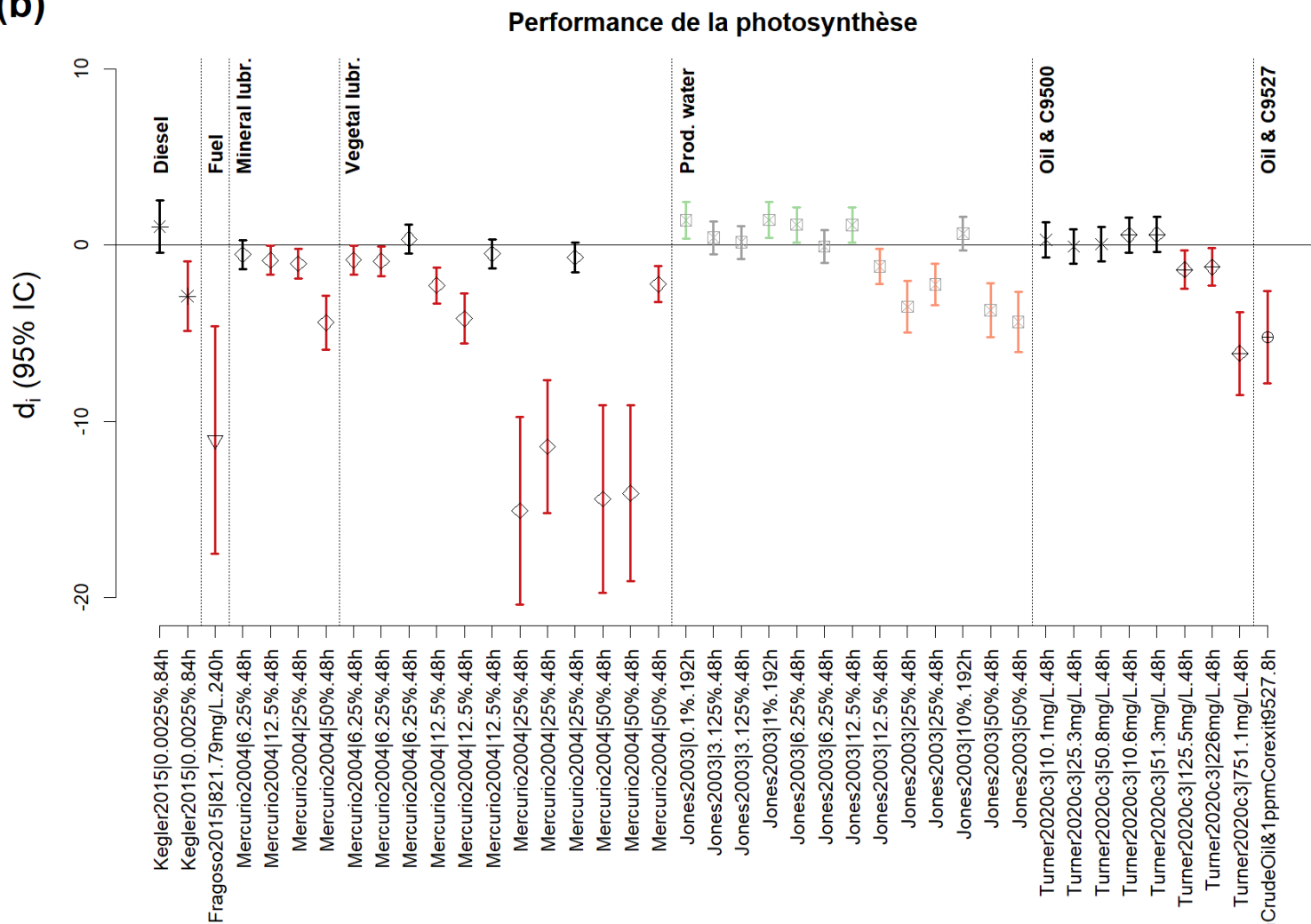


Figure 6.3b. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Croissance

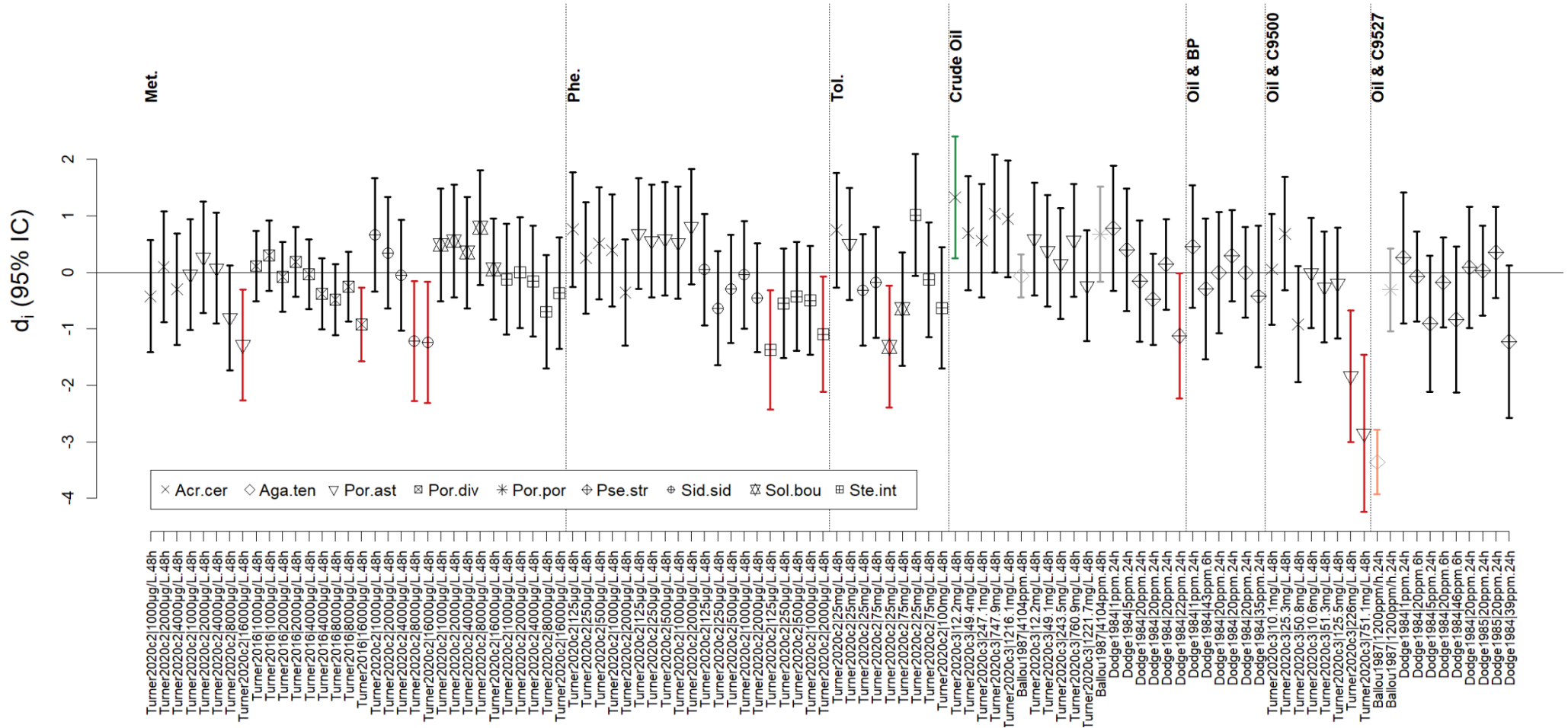


Figure 6.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

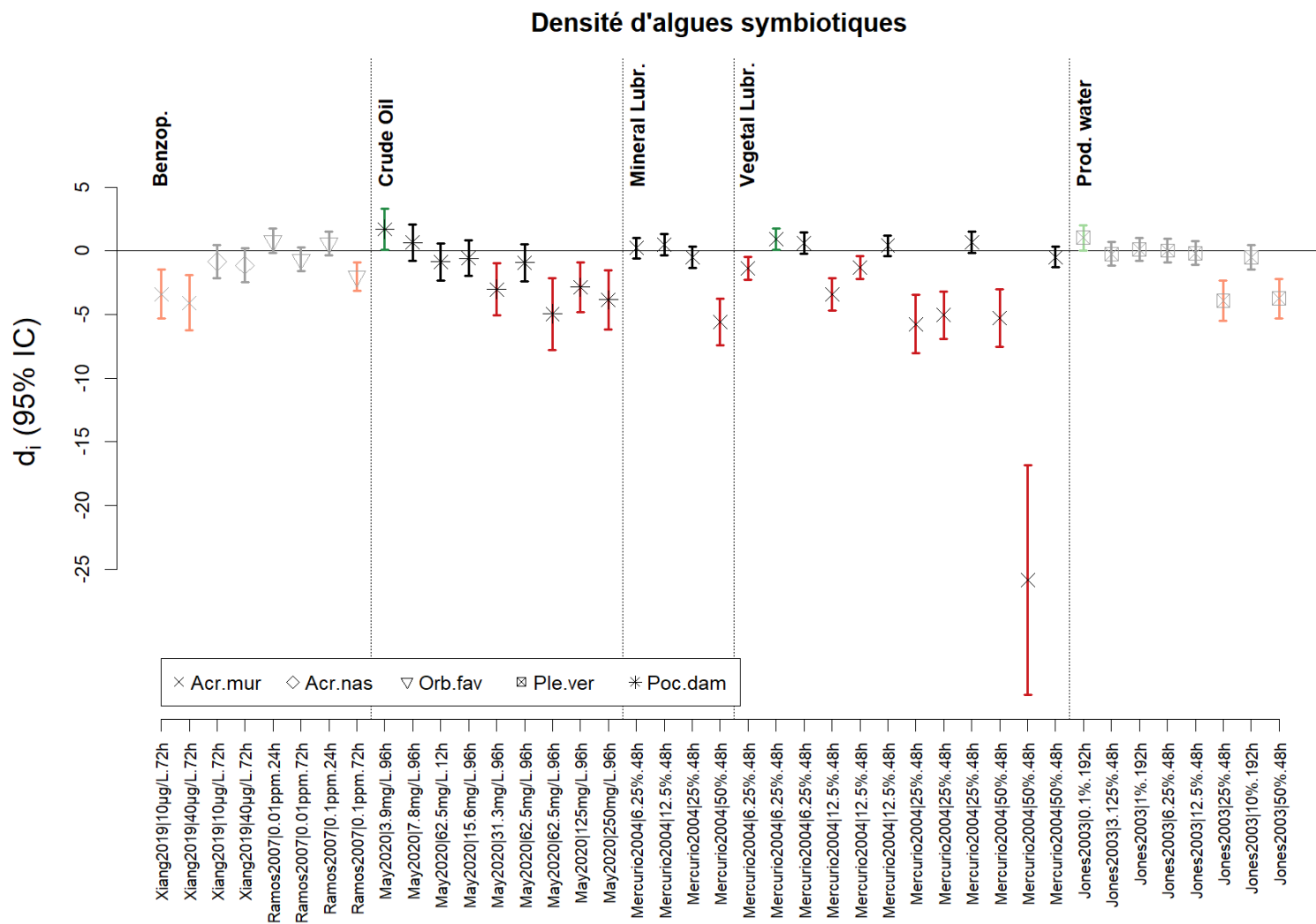


Figure 6.5. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

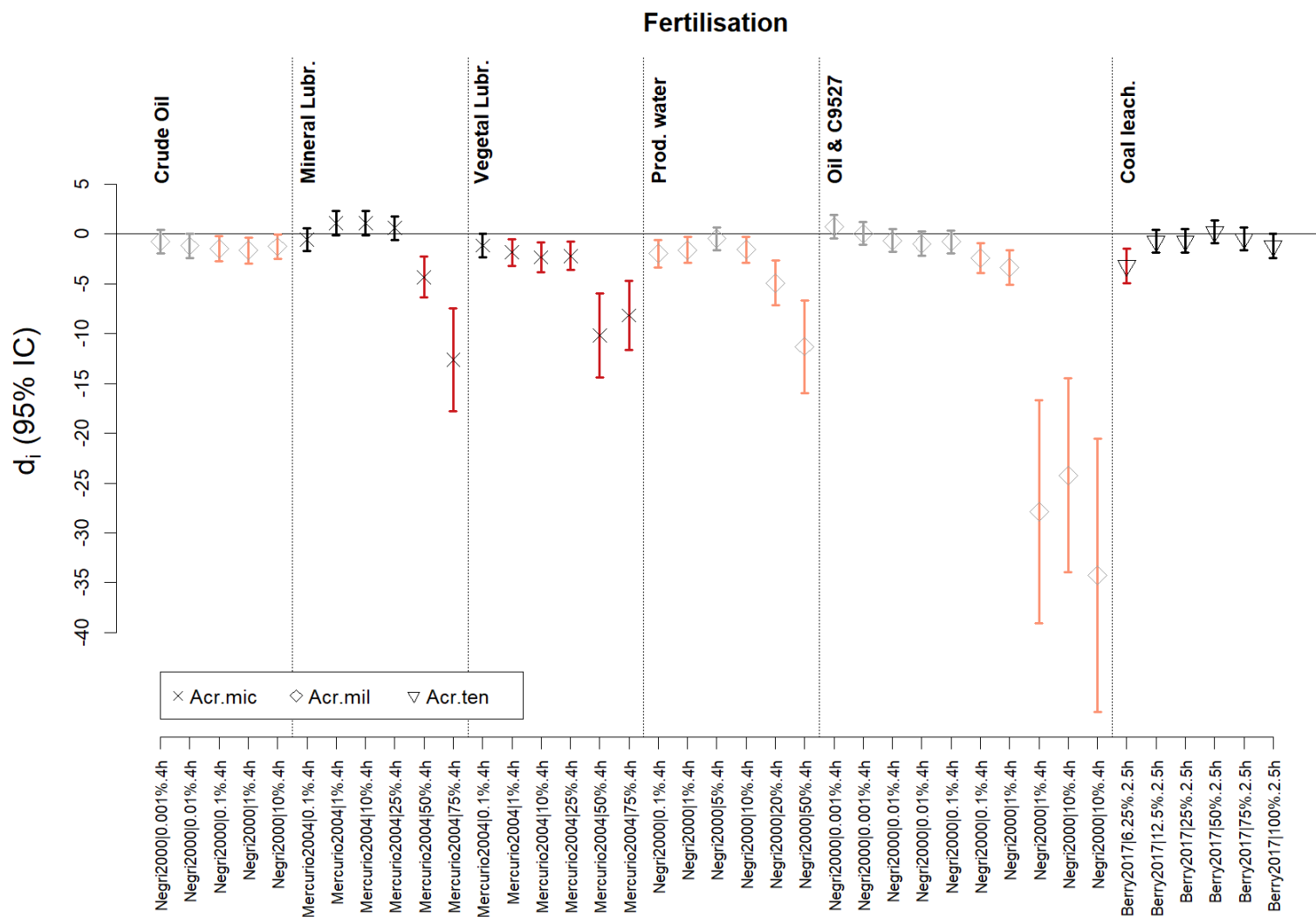


Figure 6.6. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des hydrocarbures sur le succès de la fertilisation. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 6.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 6.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Seuils de toxicité - Hydrocarbures

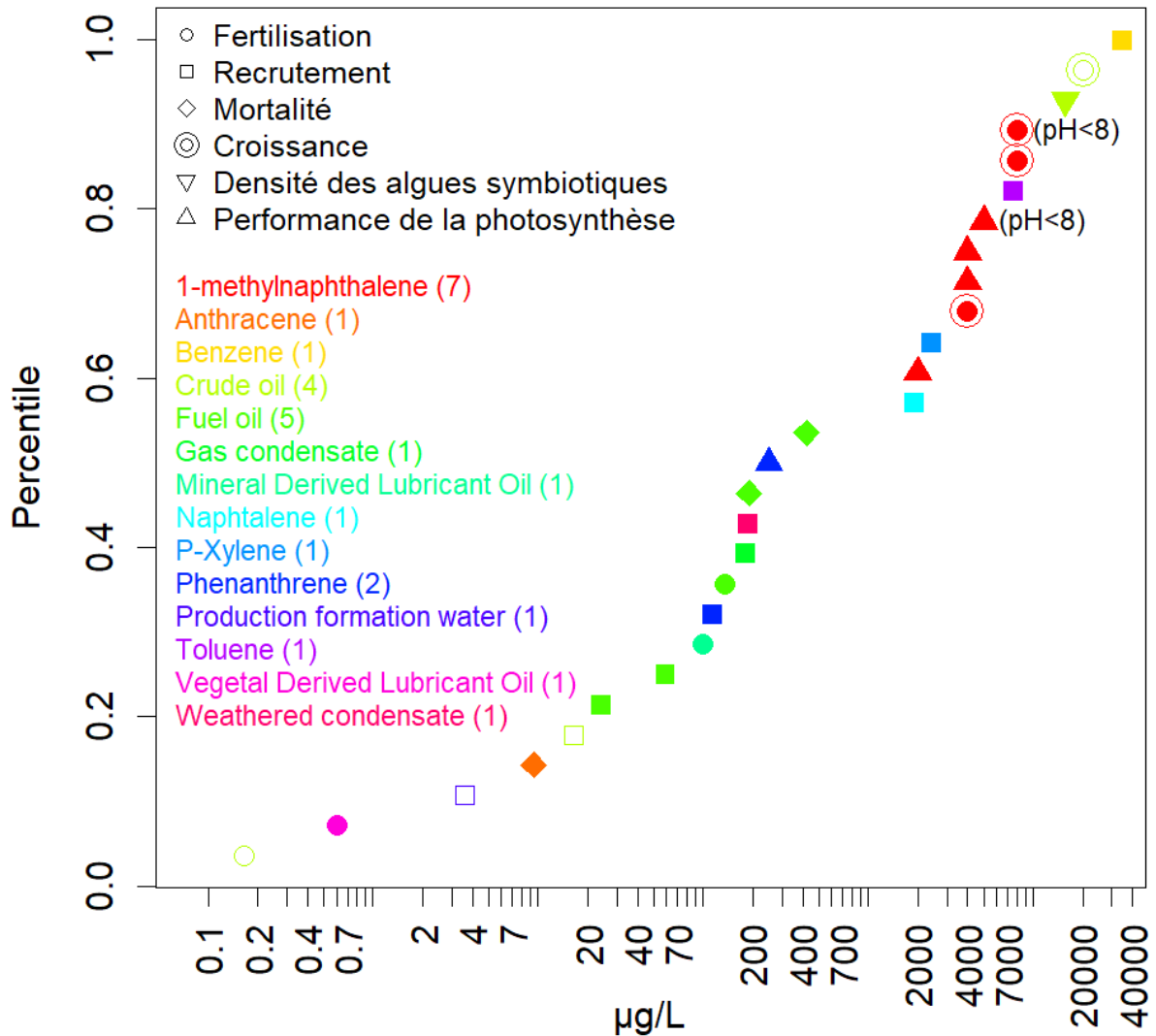


Figure 6.7. Distribution cumulative des concentrations d'exposition des seuils de toxicité ($\mu\text{g/L}$) déterminés à titre illustratif pour la catégorie des hydrocarbures. Les couleurs des points indiquent la substance (le nombre total de seuils étant indiqué entre parenthèses) et la forme des points le type de réponse mesurée. Les seuils basés sur des études présentant un faible risque de biais sont indiqués par des points pleins, et ceux correspondant à des conditions de température élevée ou de faible pH sont indiqués entre parenthèses. Les concentrations d'exposition nominales sont indiquées ici, sauf si seule la concentration effective était disponible.

Chapitre 7 Filtres ultraviolets

Ce chapitre présente la synthèse quantitative et narrative des résultats pour le groupe des **filtres ultraviolets** (UV).

7.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 164 études expérimentales correspondant à 12 documents traitent d'une exposition aux filtres UV. Parmi ces études, 23 études (correspondant à 2 mémoires de Master) ont été exclues de la synthèse car elles n'avaient pas de groupe contrôle (1 étude) ou les concentrations d'exposition étaient inconnues (22 études).

7.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **141 études** a montré que :

- **35 études / 1 document** avaient un niveau de **risque de biais fort** du fait d'une description très insuffisante des méthodes et d'un manque de rapportage de tous les résultats. Aucun résultat ne pouvait par ailleurs être extrait pour alimenter la méta-analyse (pas de moyenne par groupe traité/contrôle) ou la synthèse narrative (pas de test statistique).
- **32 études / 6 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesures des concentrations effectives d'exposition (32 études). Certaines études présentaient aussi un problème de rapportage de tous leurs résultats (8 études).
- **74 études / 3 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.

7.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 106 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 52 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible, 8 études).

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

7.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse est basée sur **46 études / 9 documents**, correspondant à **174 cas** de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative et **32 cas** pour la synthèse narrative (Annexe C). Les 9 documents sont 8 articles de revues scientifiques et un rapport qui datent de 2014 à 2019.

Les 174 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative concernent principalement une exposition aux benzophénones : benzophénone-3 (30 cas), benzophénone -1 (21 cas), benzophénone-8 (21 cas), benzophénone-4 (15 cas), benzophénone-2 (13 cas) (**Tableau 7.1**). Une exposition à des crèmes solaires de différentes marques est également testée (22 cas). Les expérimentations ont été réalisées sur 4 espèces différentes : *Seriatopora caliendrum* (73 cas), *Stylophora pistillata* (54 cas), *Pocillopora damicornis* (41 cas) et *Pocillopora elegans* (6 cas) (**Tableau 7.2**). La densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 98 cas) était la réponse la plus souvent mesurée avec le recrutement (32 cas), la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (26 cas) et la mortalité (18 cas).

Les 32 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse narrative mesurent les effets d'une exposition au benzophénone-2 (10 cas), au benzophénone-3 (9 cas), à l'octocrylène (4 cas), à des nanoparticules d'oxyde de zinc (5 cas) et de dioxyde de titane (4 cas). Les réponses mesurées sont le développement embryonnaire (10 cas), la présence de lésions dans l'ADN (9 cas), l'expulsion des algues symbiotiques (6 cas), l'expression des gènes ou l'activité enzymatique (4 cas) et le profil lipidique des membranes (3 cas).

7.5 Synthèse des résultats

Les **9 documents (46 études)** ayant alimenté les synthèses quantitative et narrative sont listés en Annexe C et le **Tableau 7.3** résume l'ensemble des résultats obtenus. Les résultats quantitatifs (d_i et intervalle de confiance à 95%) et narratifs sont fournis au format Excel en Annexe C, avec les caractéristiques des expériences (e.g. température, stade de développement, et concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Les résultats quantitatifs sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 7.1 et 7.2**. Certaines expériences ont été conduites dans des conditions acides pour les coraux (pH = 7.7).

En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à des **nanoparticules d'oxyde de zinc**, à des **nanoparticules de dioxyde de titane Optisol™** et **Eusolex®T2000**, à l'**avobenzone**, au **benzophénone-1**, au **benzophénone-2**, au **benzophénone-3**, au **benzophénone-8** et à l'**octocrylène** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. L'exposition **combinée** à l'**EHMC** et à l'**octocrylène**, ou l'exposition à une solution de crème solaire de marque inconnue contenant ces deux substances a également montré un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour une exposition au **benzophénone-4**, à l'**EHMC** (en exposition simple), au **Mexoryl XL**, à l'**Ecamsule** (mais voir **Tableau 7.3**) et à l'**Uvinule T150**, pour les concentrations-durées testées. L'exposition aux crèmes solaires de marque Badger, Banana boat ou Renewal n'a également montré aucun effet statistiquement négatif sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques pour les concentrations-durées testées.

Certains effets à première vue « positifs » d'une exposition au Mexoryl XL, à l'Ecamsule et à l'Uvinule T150 sur la performance de la photosynthèse (**Figure 7.2b**) peuvent s'expliquer par une absence d'effet de l'exposition et de la variabilité naturelle des réponses, entraînant une valeur plus faible dans le groupe contrôle que dans le groupe traité. Des variations de conditions de laboratoire pourraient également expliquer ces résultats, les auteurs de l'étude évoquant la possibilité d'un effet « aquarium » sur les coraux (disponibilité en nutriments, mouvement de l'eau).

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 7.1 et 7.2**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. La **Figure 7.3** présente, à titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif qu'il est possible de déterminer pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Ces seuils vont de 1 µg/L (benzophénone-8, recrutement) à 100 µg/L (benzophénone-8, densité des algues symbiotiques (blanchissement)) lorsque seules les études présentant un faible risque de biais sont prises en compte, et de 0.615 µg/L (benzophénone-2, mortalité) à 100 µg/L (benzophénone-8, densité des algues symbiotiques (blanchissement)) lorsque toutes les études sont prises en compte.

Tableau 7.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras et numéro CAS.

Exposition	CAS
Zinc oxide nanoparticule (nZnO)	
Titanium dioxide Optisol™	
Titanium dioxide Eusolex®T2000	
4-tert-butyl-4-methoxydibenzoylmethane (Avobenzene, Avo)	70356-09-1
2,4-Dihydroxybenzophenone (Benzophenone-1, BP1)	131-56-6
2,2',4,4'-tetrahydroxybenzophenone (Benzophenone-2, BP2)	131-55-5
Oxybenzone (Benzophenone-3, BP3)	131-57-7
Sulisobenzene (Benzophenone-4, BP4)	4065-45-6
2,2'-Dihydroxy-4-methoxybenzophenone (Benzophenone-8, BP8)	131-53-3
Ethylhexyl methoxycinnamate (octinoxate, EHMC)	5466-77-3
2-ethylhexyl 2-cyano-3,3-diphenylacrylate (Octocrylene, OC)	6197-30-4
Drometrizole trisiloxane (Mexoryl XL, Mex.XL)	155633-54-8
Terephthalylidene dicamphor sulfonic acid (Mexoryl SX, Ecamsule, Ecarn.)	92761-26-7
Ethylhexyl triazone (Uvinul T150, Uvi)	88122-99-0
Ethylhexylmethoxy-cinnamate & Octocrylene (EHMC & OC)	
Crème solaire de la marque dite "coral-friendly" Badger (C.bad) [Seul ingrédient actif : mineral zinc oxide]	
Crème solaire de la marque Banana boat (C.bb) [Substances actives : Butyl Methoxybidenzoylmethane 5%, 4-Methylbenzylidene Camphor 4%, Octocrylene 2%, Bemotrizinol 1% + Preservatives: Phenoxyethanol, Hydroxybenzoates]	
Crème solaire de la marque Renewal (C.ren) [Pas d'information sur la composition]	
Crème solaire de marque inconnue (C.x) [Composition 7% w/w EHMC and 3.6% w/w OC; water, polyhydroxystearic acid, lecithin, ethylhexyl palmitate, isopropyl palmitate, isostearic acid, polyglyceryl-3 polyricinoleate, caprylic, capric triglyceride, sodium hyaluronate, aloe vera, chamomile extract, niacinamide, dexpanthenol, Peucedanum ostruthium extract, Rosa damascena flower water, colloidal platinum, titanium dioxide/ alumina/ triethoxycaprylyl silane, isopropyl palmitate, sorbitan olivate, lauryl PEG/ PPG-18/ 18 methicone, cetyl ethylhexanoate, sodium chloride, cylcerine, iodopropynyl butylcarbamate, methylisothiazolinone]	

Tableau 7.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Densité des algues symbiotiques	Recrutement	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Croissance	Fertilisation	Autres outcomes
<i>Seriatopora caliendrum</i> (Ser.cal)	41	32					3
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)	10		26	18			19
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)	41						4
<i>Pocillopora elegans</i> (Poc.ele)	6						
<i>Acropora spp.</i>							6
Total	98	32	26	18			32

Tableau 7.3. Résumé des résultats par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées. *Pour les effets d'une exposition à l'Ecamsule la diminution statistiquement significative de la performance de la photosynthèse observée uniquement pour l'exposition à 100 µg/L a été considérée comme un artefact (les concentrations testées allaient de 10 à 5000 µg/L et la répétition de l'exposition à 100 µg/L n'a pas entraîné d'effet statistiquement significatif).

Exposition	Densité des algues symbiotiques	Recrutement	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Croissance	Fertilisation	Autres outcomes (synth. narrative)	Résumé
Zinc oxide nanoparticule			Oui				Oui	Oui
Titanium dioxide Optisol™							Oui	Oui
Titanium dioxide Eusolex®T2000							Oui	Oui
4-tert-butyl-4-methoxydibenzoylmethane (Avobenzone)			Oui					Oui
2,4-Dihydroxybenzophenone (Benzophenone-1)	Oui	Oui						Oui
2,2',4,4'-tetrahydroxybenzophenone (Benzophenone-2)	Oui			Oui			Oui	Oui
Oxybenzone (Benzophenone-3)	Oui	NS		Oui			Oui	Oui
Sulisobenzone (Benzophenone-4)	NS	NS						NS
2,2'-Dihydroxy-4-methoxybenzophenone (Benzophenone-8)	Oui	Oui						Oui
Ethylhexyl methoxycinnamate (octinoxate, EHMC)	NS							NS
2-ethylhexyl 2-cyano-3,3-diphenylacrylate (Octocrylene)	NS		Oui				Oui	Oui
Drometrizole trisiloxane (Mexoryl XL)			NS					NS
Terephthalylidene dicamphor sulfonic acid (Mexoryl SX, Ecamsule)			Oui*					NS*
Ethylhexyl triazone (Uvinul T150)			NS					NS
Ethylhexylmethoxy-cinnamate (EHMC) & Octocrylene	Oui							Oui
Crème solaire de la marque dite "coral-friendly" Badger	NS							NS
Crème solaire de la marque Banana boat	NS							NS
Crème solaire de la marque Renewal	NS							NS
Crème solaire de marque inconnue	Oui							Oui

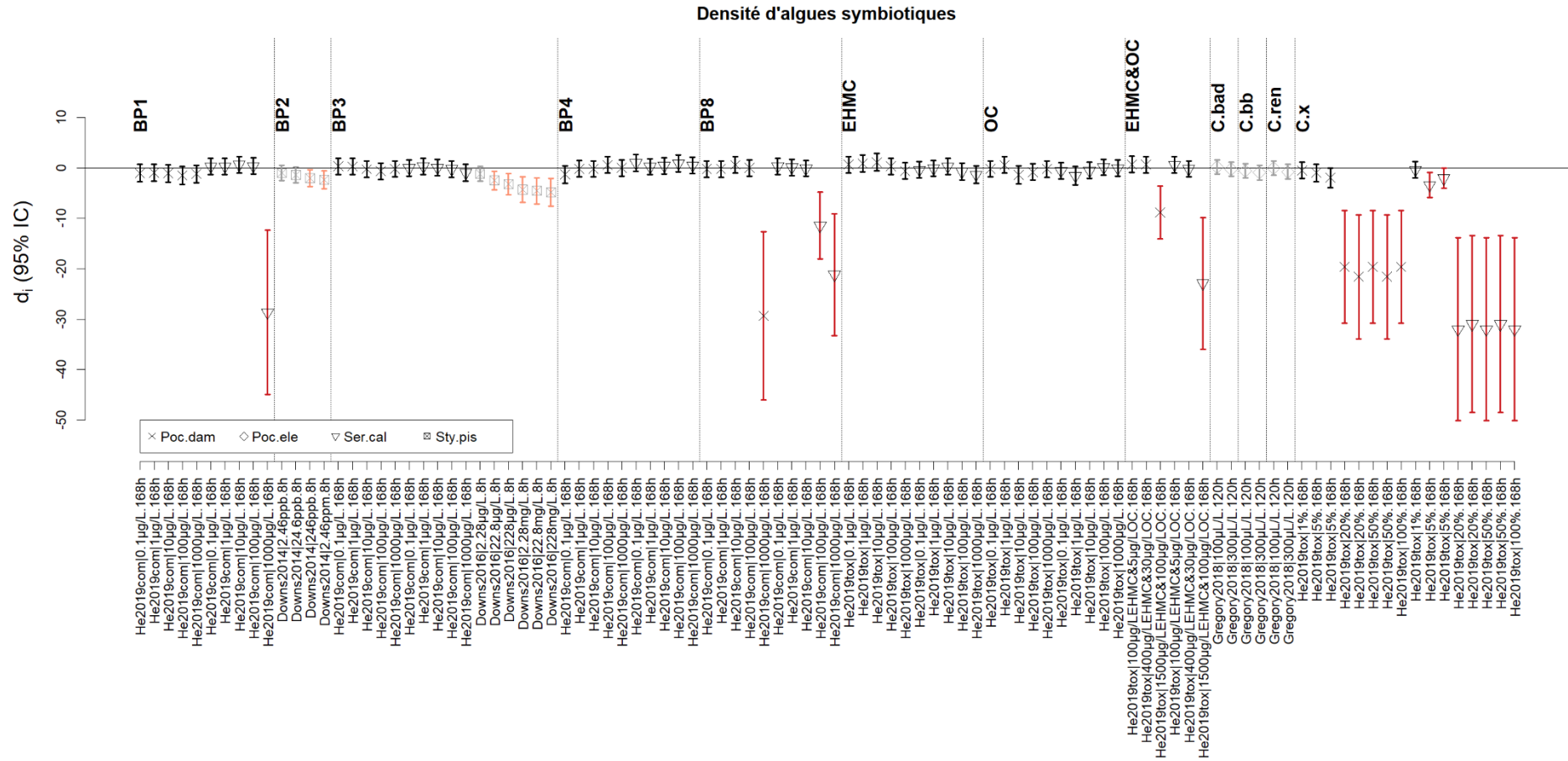


Figure 7.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des filtres UV sur la densité d'algues symbiotiques (blanchissement). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 7.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 7.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les expositions ont été testées sur des colonies adultes de *Pocillopora damicornis* (Poc.dam), *Pocillopora elegans* (Poc.ele) et *Seriatopora caliendrum* (Ser.cal) et sur des larves de *Stylophora pistillata* (Sty.pis). Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

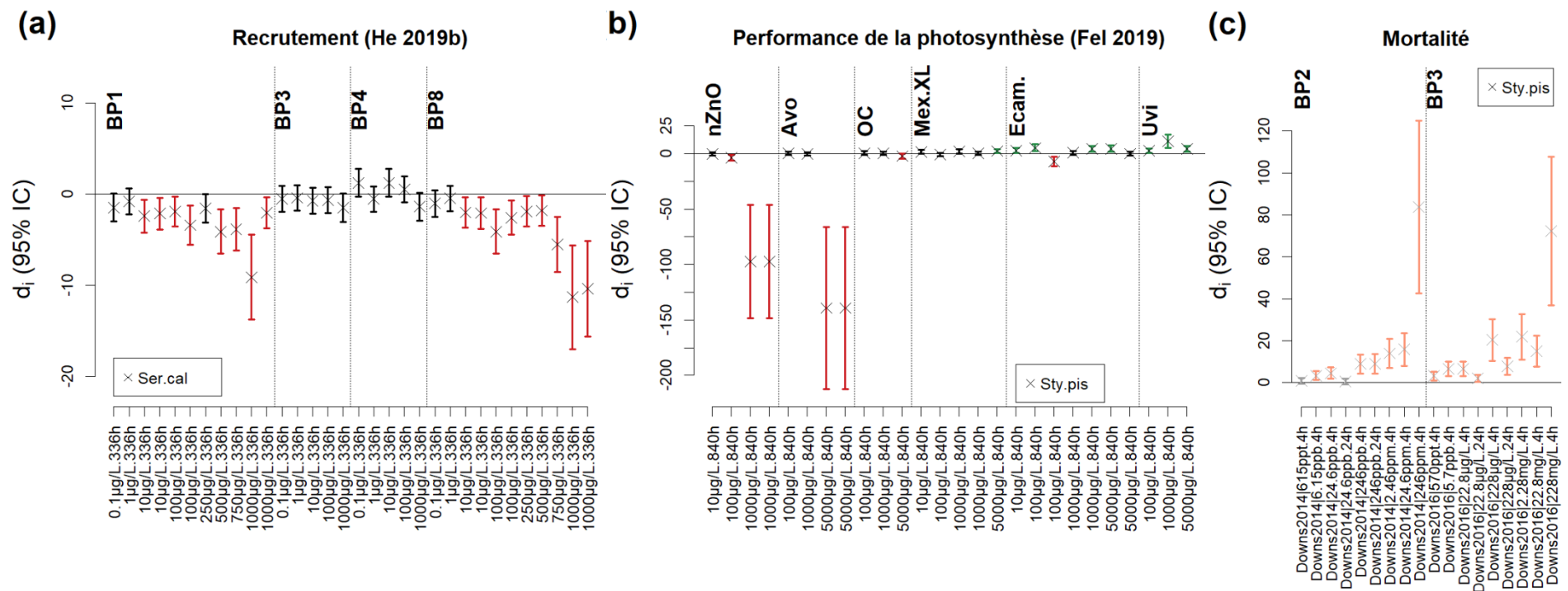


Figure 7.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des filtres UV sur (a) le recrutement, (b) la performance de la photosynthèse et (c) la mortalité. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 7.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 7.2** pour la légende des espèces). Les expositions ont été testées sur (a) des larves de *Seriatopora caliendrum* (*Ser.cal*), (b) des colonies adultes de *Stylophora pistillata* (*Sty.pis*) et (c) des cellules et des larves de *S. pistillata*. Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet négatif pour le corail pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori positif pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Seuils de toxicité - Filtres UV

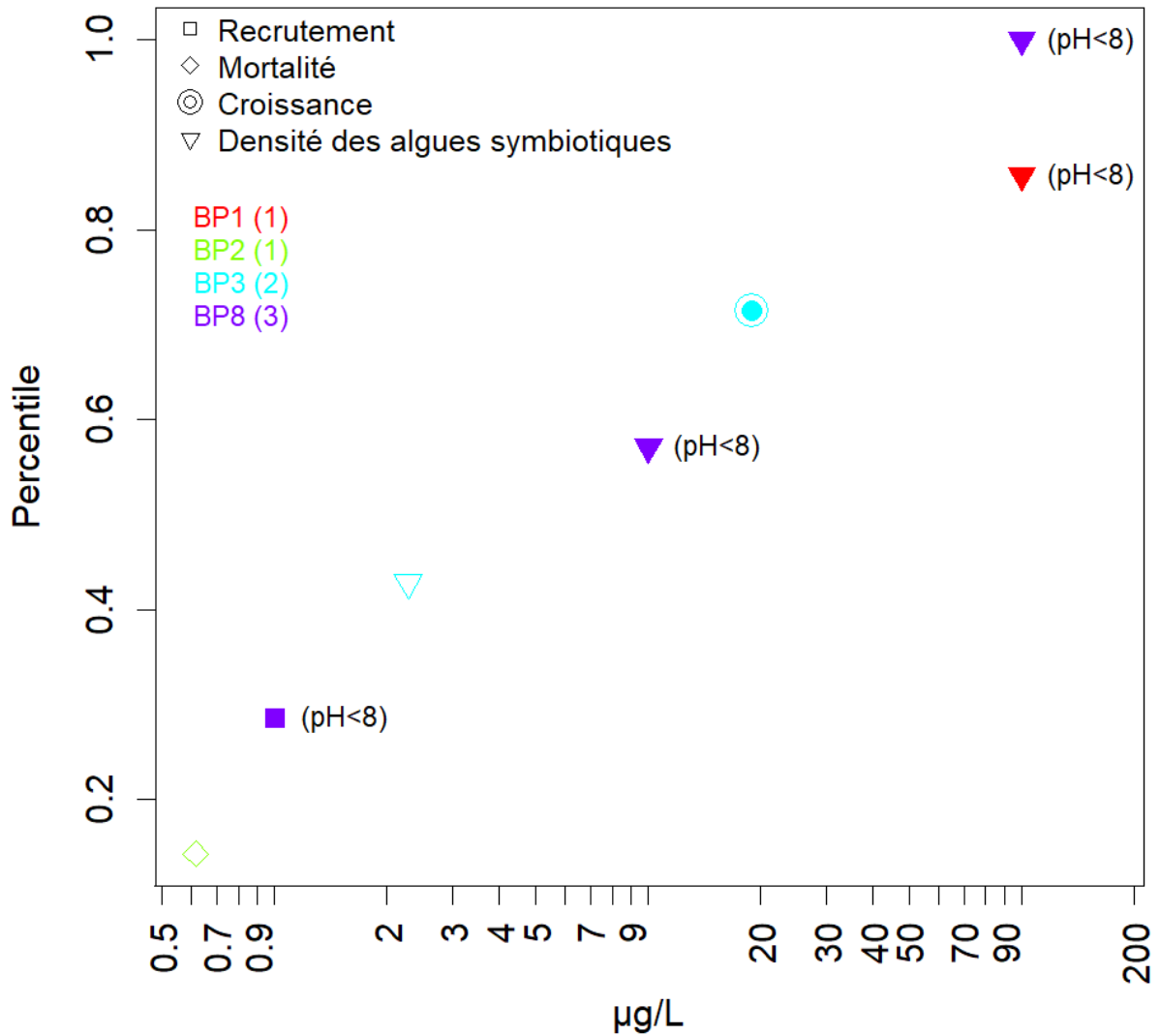


Figure 7.3. Distribution cumulative des concentrations d'exposition des seuils de toxicité (µg/L) déterminés à titre illustratif pour la catégorie des filtres ultraviolets. Les couleurs des points indiquent la substance (le nombre total de seuils étant indiqué entre parenthèses) et la forme des points le type de réponse mesurée. Les seuils basés sur des études présentant un faible risque de biais sont indiqués par des points pleins, et ceux correspondant à des conditions de température élevée ou de faible pH sont indiqués entre parenthèses. Les concentrations d'exposition nominales sont indiquées ici.

Chapitre 8 Pharmaceutiques

Ce chapitre présente la synthèse quantitative et narrative des résultats pour le groupe des pharmaceutiques.

8.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 109 études expérimentales (hors bioaccumulation) correspondant à 22 documents traitent d'une exposition aux pharmaceutiques, mais 1 étude (correspondant à 1 document) a été exclue car elle n'avait pas de groupe contrôle.

8.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **108 études** a montré que :

- **Aucune étude** n'avait un niveau de **risque de biais fort**.
- **106 études / 22 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesure des concentrations effectives d'exposition (106 études) mais aussi parce qu'elles n'étaient pas répliquées (29 études) ou qu'il y avait de légères différences entre les groupes contrôle et traité (7 études).
- **2 études / 1 document** avaient un niveau de **risque de biais faible**.⁴

8.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 108 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 45 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible, 2 études) ;
- les études étaient des erreurs de metacoding (2 études).

Enfin, pour 4 études, les données ont été extraites mais il n'a pas été possible de calculer une différence de moyennes standardisée d_i car $S_{commune_i}$ était nulle.

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

⁴ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

8.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse est basée sur **55 études / 13 documents**, correspondant à **81 cas** de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative et **41 cas** pour la synthèse narrative (Annexe C). Les 13 documents sont 13 articles de revues scientifiques qui datent de 1998 à 2020.

Les 81 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative concernent principalement une exposition à l'eugénol (« clove oil ») (31 cas) ; à la sérotonine (8 cas) ; au vérapamil (7 cas) et à l'épinéphrine (6 cas) (**Tableau 8.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 9 espèces différentes (**Tableau 8.2**), principalement *Leptastrea purpurea* (27 cas) et *Pocillopora damicornis* (18 cas). Le recrutement est la réponse la plus souvent mesurée (26 cas) suivie par la croissance (19 cas), la densité d'algues symbiotiques (17 cas), la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (10 cas) et la mortalité (9 cas).

Les 41 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse narrative mesurent principalement les effets de pharmaceutiques sur la diversité, l'abondance, la composition ou l'activité des bactéries associées aux coraux (12 cas), ainsi que sur des variables de reproduction des coraux (9 cas). L'efficacité de pharmaceutiques pour le traitement de lésions est aussi évaluée (8 cas), **mais il faut noter que dans ces cas ce n'est pas la toxicité qui est évaluée mais la capacité des pharmaceutiques à traiter les maladies des coraux.**

8.5 Synthèse des résultats

Les **13 documents (55 études)** ayant alimenté les synthèses quantitative et narrative sont listés en Annexe C et le **Tableau 8.3** résume l'ensemble des résultats obtenus. Les résultats quantitatifs (d_i et intervalle de confiance à 95%) et narratifs sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Certaines expériences ont testé l'effet d'une exposition aux pharmaceutiques avec l'effet combiné d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$), ou certaines expériences étaient réalisées dans des conditions acides pour les coraux (pH = 7.8). Les résultats quantitatifs sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 8.1 à 8.5**.

Toutes les études avaient un niveau de risque de biais moyen, exceptées les études testant une exposition à l'estradiol qui avaient un niveau de risque de biais faible.

L'exposition à l'**eugénol**, à l'**épinéphrine**, à l'**estradiol**, l'**estrone**, au **péroxyde d'hydrogène**, à la **ciprofloxacine**, la **tunicamycine**, et au **vérapamil** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. Les expositions à des **combinaisons d'antibiotiques** ont également eu un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour une exposition au **3,4-dihydroxy-L-phenylalanine**, à la **dopamine**, au **5-Hydroxy-L-tryptophan**, à l'**acide l-glutamique**, à la **naloxone**, à la **sérotonine**, et à des **polymères d'acide ϵ -caprolactone-p-coumaric** appliqués seuls ou en association avec un film contenant de la ciproflaxine, pour les concentrations-durées testées.

Certains effets « positifs » d'une exposition à la dopamine et l'épinéphrine sur le recrutement des larves de *Leptastrea purpurea* (**Figure 8.1**) s'expliquent par la nature de l'étude réalisée. Dans cette étude, les larves ont été exposées à plusieurs neurotransmetteurs à différentes concentrations pour

mieux comprendre le mécanisme de recrutement. L'épinéphrine et la dopamine, à certaines concentrations (10^{-6} M, 10^{-5} M), ont induit le recrutement des larves alors qu'aucun recrutement n'était observé dans le groupe contrôle. Il faut toutefois noter qu'à des concentrations plus élevées (10^{-4} M, 10^{-3} M) l'épinéphrine et la dopamine étaient létales (Annexe C, **Figure 8.5**).

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 8.1 à 8.5**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. Il semble toutefois que cette analyse de risque sera limitée pour la catégorie des pharmaceutiques. En effet, en prenant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par substance, type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études, aucun seuil de toxicité (plus haute concentration sans effet nocif) n'a pu être déterminé.

Tableau 8.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
3,4-dihydroxy-L-phenylalanine (L-DOPA)	59-92-7
Clove oil (Eugenol)	8000-34-8
Dopamine hydrochloride (Dopamine)	62-31-7
Epinephrine	51-43-4
Estradiol	50-28-2
Estrone	53-16-7
Hydrogen peroxide (H2O2)	7722-84-1
5-Hydroxy-L-tryptophan (L-5-HTP)	4350-09-8
L-glutamic acid (L-glutamic)	56-86-0
Naloxone hydrochloride dihydrate (Naloxone)	51481-60-8
Serotonin	50-67-9, 153-98-0
Ciprofloxacin	85721-33-1
Tunicamycin	11089-65-9
Verapamil	152-11-4
Antibiotic mix (Ampicillin & Streptomycin & Kanamycin & Neomycin & Rifampicin & Polymixin-B & Nystatin & Erythromycin & Gentamycin) (Antibiotic mix1)	
Antibiotics (Ampicillin & Streptomycin & Nalidixic acid) (Antibiotic mix2)	
Antibiotics (Ampicillin & Streptomycin & Nalidixic Acid & Ciprofloxacin) (Antibiotic mix3)	
ϵ -caprolactone-p-coumaric acid copolymers	
Bilayer wound dressing films (Ciprofloxacin & acetic acid, hyaluronic acid, polyvinylpyrrolidone, glycerol, PVP, NEOMERCUCROMO, ϵ -caprolactone-p-coumaric acid copolymers)	
Biodegradable hydrophobic ointment & Amoxicillin	
Silicone-based paste & Amoxicillin	

Tableau 8.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Recrutement	Croissance	Densité des algues symbiotiques	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Fertilisation	Autres outcomes
<i>Leptastrea purpurea</i> (Lep.pur)	26				1		
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)		3	6	7	2		7
<i>Acropora cervicornis</i> (Acr.cer)					6		6
<i>Fimbriaphyllia paradviva</i> (Fim.par)				3			6
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Poc.ver)		4	4				
<i>Porites australiensis</i> (Por.aus)		4	4				
<i>Acropora striata</i> (Acr.str)		4	3				
<i>Porites astreoides</i> (Por.ast)							5
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)							4
<i>Porites compressa</i> (Por.com)		2					1
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)		2					1
<i>Montipora capitata</i> (Mon.cap)							3
<i>Colpophyllia natans</i> (Col.nat)							2
<i>Montastraea cavernosa</i> (Mon.cav)							2
<i>Orbicella faveolata</i> (Orb.fav)							2
<i>Diploria labyrinthiformis</i> (Dip.lab)							1
<i>Pseudodiploria strigosa</i> (Pse.str)							1
Total	26	19	17	10	9		41

Tableau 8.3. Résumé des résultats de la synthèse par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées. Le résultat « NS+ » indique que ce n'est pas la toxicité qui a été évaluée mais la capacité des pharmaceutiques à traiter les maladies des coraux.

Exposition	Recrutement	Croissance	Densité des algues symbiotiques	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Fertilisation	Autres outcomes (synth. narrative)	Résumé
3,4-dihydroxy-L-phenylalanine (L-DOPA)	NS							NS
Clove oil (Eugenol)		Oui	Oui	Oui	NS			Oui
Dopamine hydrochloride (Dopamine)	NS							NS
Epinephrine	NS				Oui			Oui
Estradiol							Oui	Oui
Estrone		Oui					NS	Oui
Hydrogen peroxide (H2O2)					Oui		NS	Oui
5-Hydroxy-L-tryptophan (L-5-HTP)					NS		NS	NS
L-glutamic acid (L-glutamic)	NS							NS
Naloxone hydrochloride dihydrate (Naloxone)					NS		NS	NS
Serotonin	NS				NS		NS	NS
Ciprofloxacin							Oui	Oui
Tunicamycin		Oui						Oui
Verapamil		Oui		Oui			Oui	Oui
Antibiotic mix (Ampicillin & Streptomycin & Kanamycin & Neomycin & Rifampicin & Polymixin-B & Nystatin & Erythromycin & Gentamycin) (Antibiotic mix1)							Oui	Oui
Antibiotics (Ampicillin & Streptomycin & Nalidixic acid) (Antibiotic mix2)				Oui			(Oui)	Oui
Antibiotics (Ampicillin & Streptomycin & Naladixic Acid & Ciprofloxacin) (Antibiotic mix3)			Oui	NS			Oui	Oui
ε-caprolactone-p-coumaric acid copolymers							NS	NS
Bilayer wound dressing films (Ciprofloxacin & acetic acid, hyaluronic acid, polyvinylpyrrolidone, glycerol, PVP, NEOMERCUCROMO, ε-caprolactone-p-coumaric acid copolymers)							NS	NS
Biodegradable hydrophobic ointment & Amoxicillin							NS+	NS+
Silicone-based paste & Amoxicillin							NS+	NS+

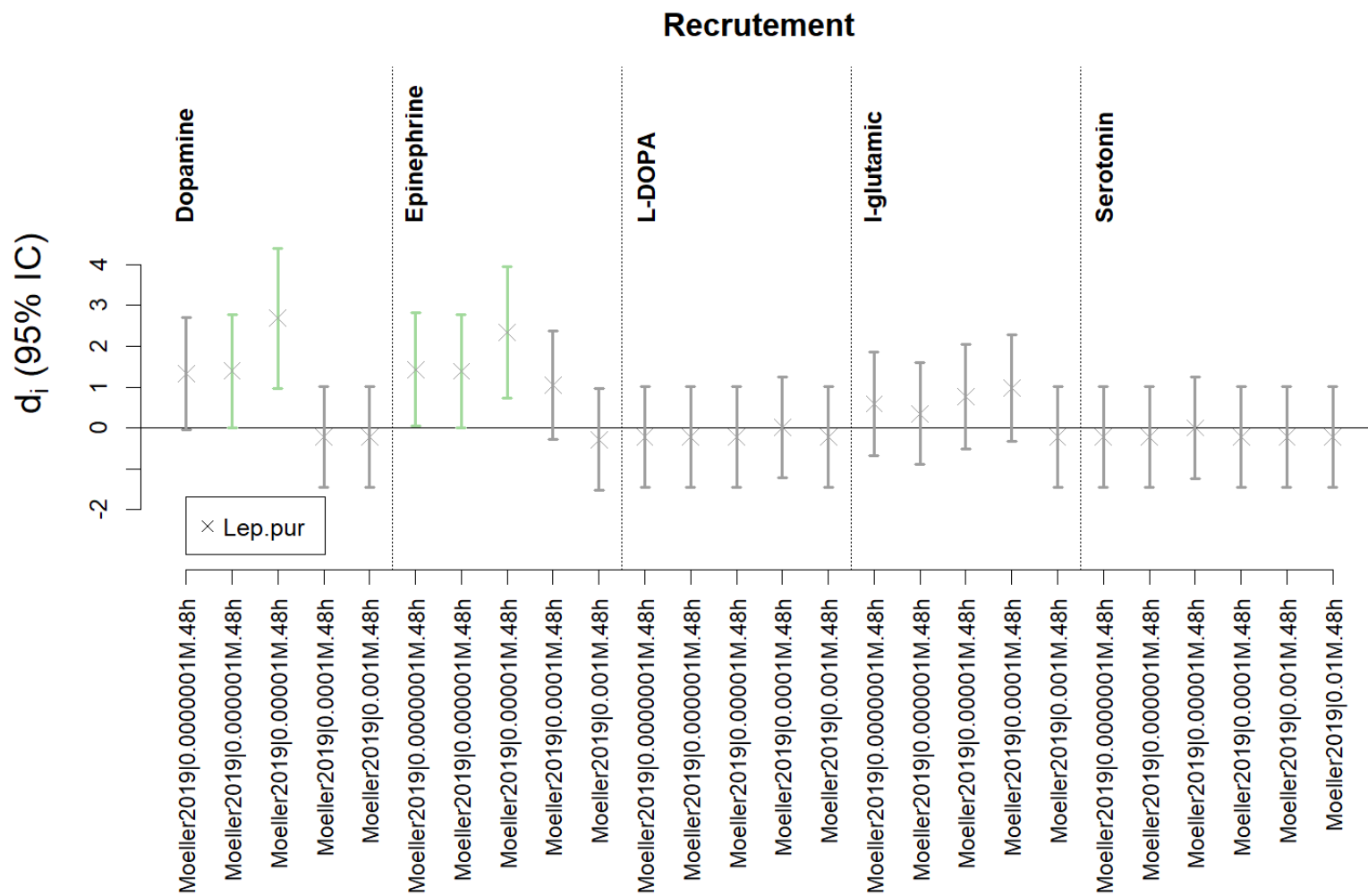


Figure 8.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pharmaceutiques sur le recrutement des larves de coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 8.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 8.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

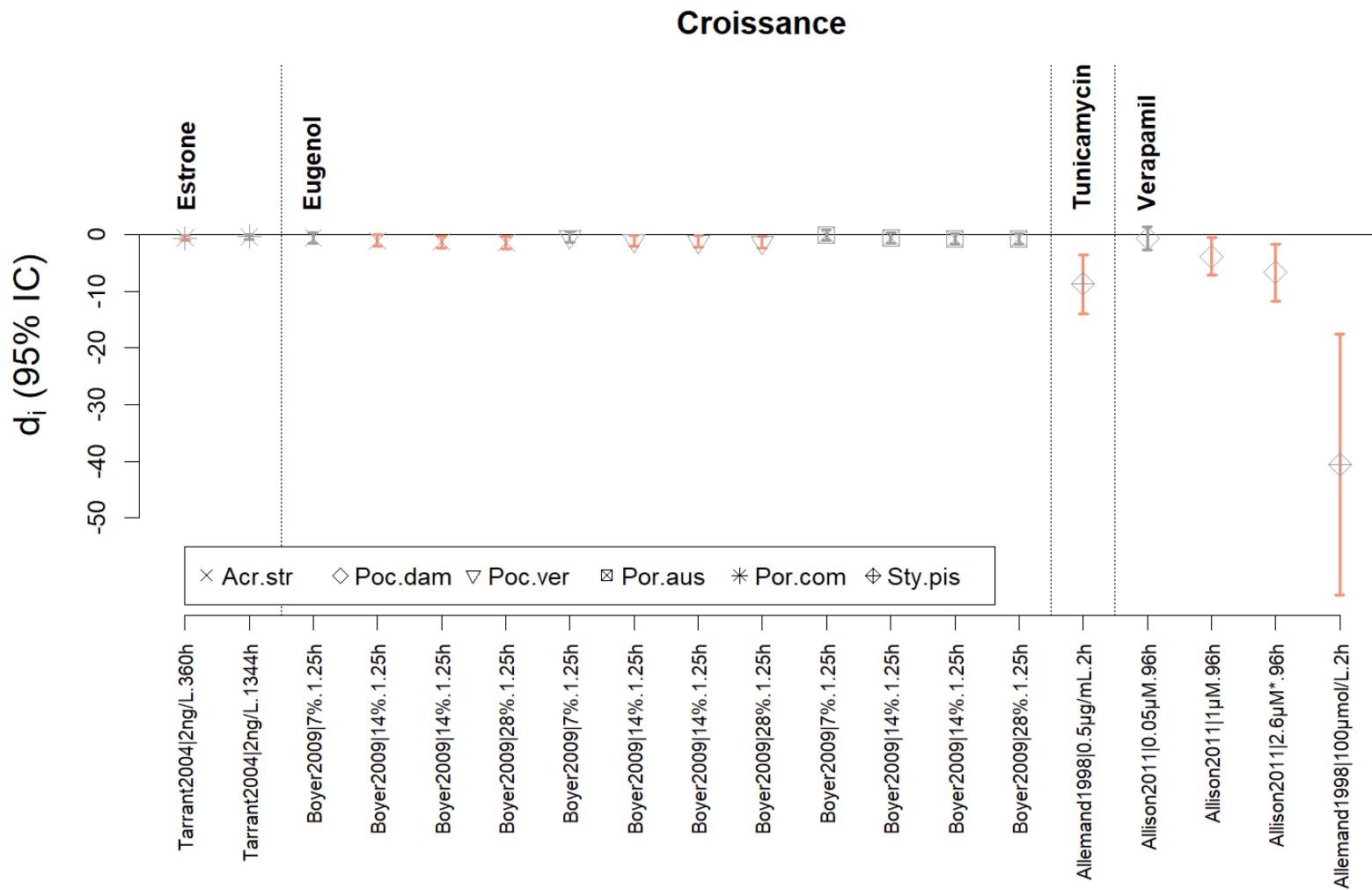


Figure 8.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pharmaceutiques sur la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 8.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 8.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Densité d'algues symbiotiques

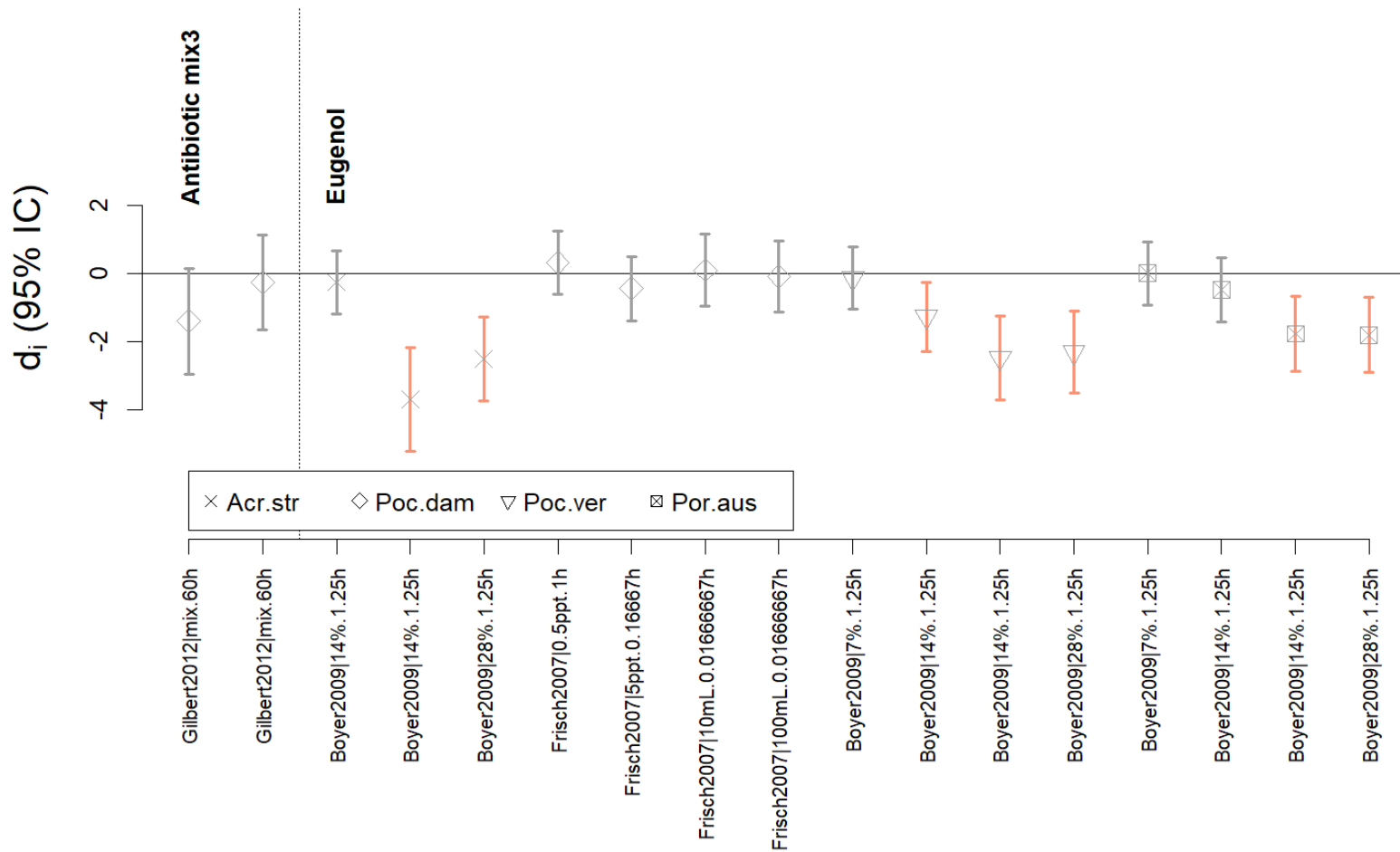


Figure 8.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pharmaceutiques sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 8.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 8.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Performance de la photosynthèse

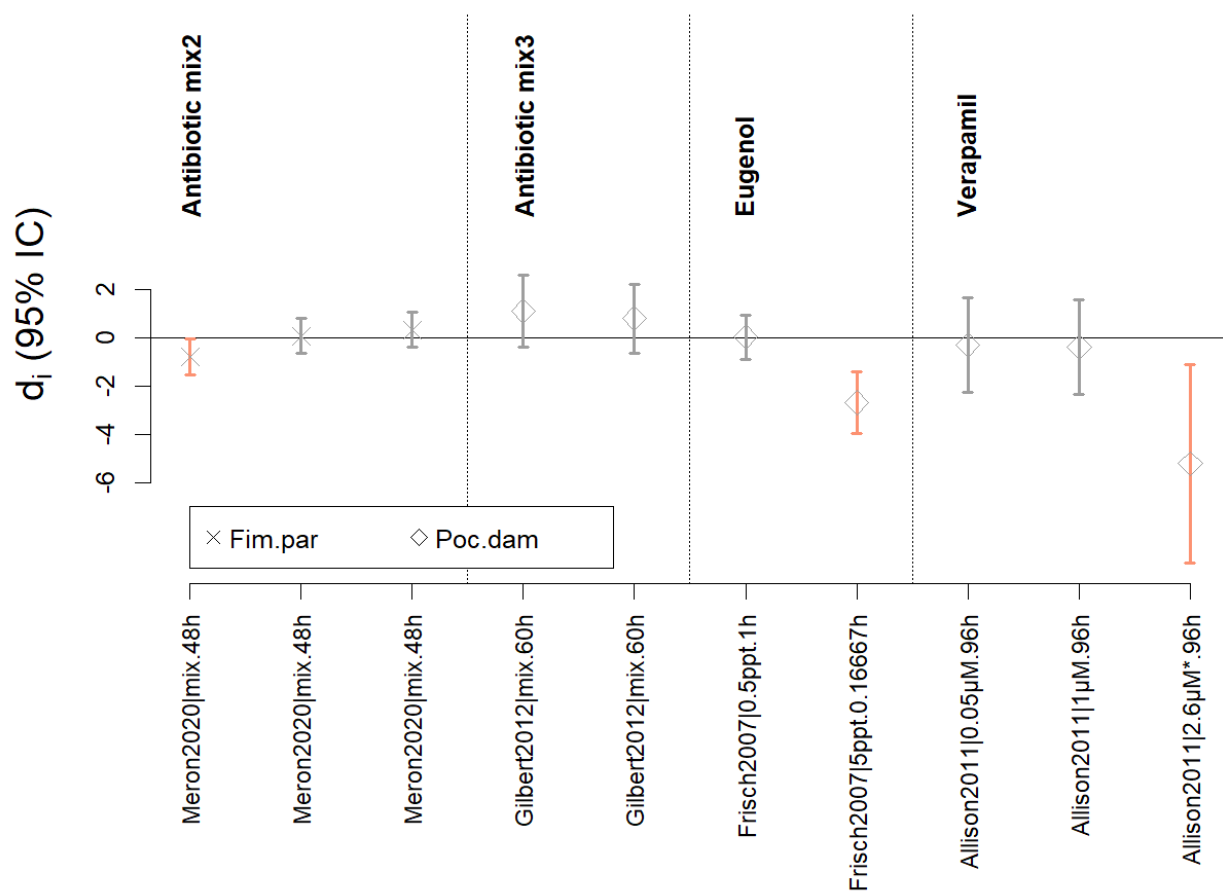


Figure 8.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pharmaceutiques sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 8.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 8.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

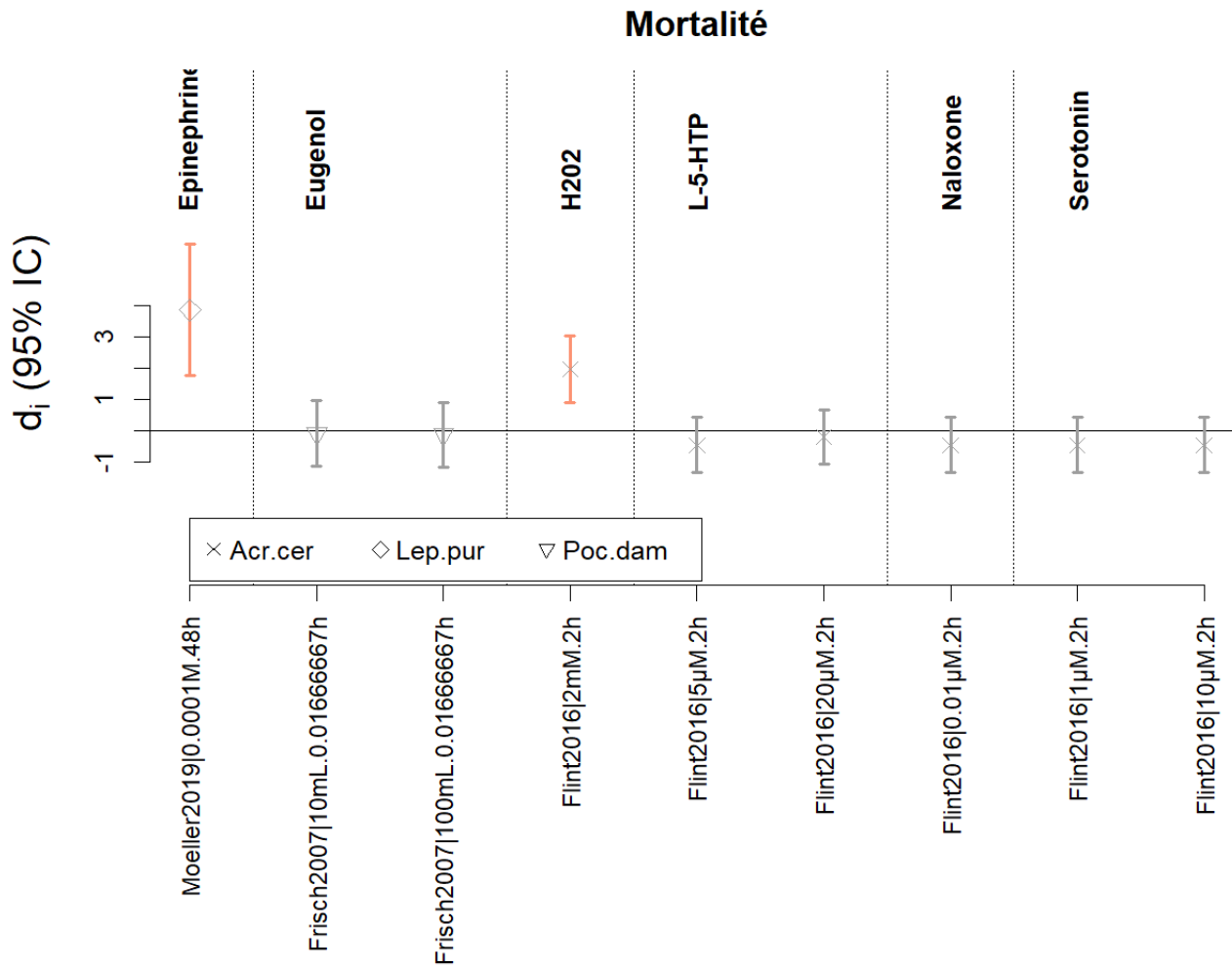


Figure 8.5. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des pharmaceutiques sur la mortalité de coraux adultes (Acr.cer, Poc.dam) et au stade larvaire (Lep.pur). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 8.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 8.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Chapitre 9 Microplastiques

Ce chapitre présente la synthèse quantitative et narrative des résultats pour le groupe des **microplastiques**.

9.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 86 études expérimentales (hors bioaccumulation, ingestion ou adhésion) correspondant à 9 documents traitent d'une exposition aux microplastiques, mais 1 étude (correspondant à 1 document) a été exclue car les concentrations d'exposition étaient inconnues.

9.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **85 études** a montré que :

- **Aucune étude** n'avait un niveau de **risque de biais fort**.
- **6 études / 2 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** parce qu'elles ne mentionnaient pas de mesure des concentrations effectives d'exposition.
- **79 études / 6 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.⁵

9.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 85 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 24 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible, 25 études).

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

9.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse est basée sur **36 études / 7 documents**, correspondant à **55 cas** de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative et **37 cas** pour la synthèse narrative (Annexe C). Les 7 documents sont des articles de revues scientifiques qui datent de 2018 à 2020.

Les 55 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative concernent principalement une exposition au polyéthylène (36 cas) et au polypropylène (18 cas), ainsi qu'une

⁵ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

exposition au polystyrène (1 cas) (**Tableau 9.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 9 espèces différentes, un résultat étant reporté pour un ensemble de deux espèces (**Tableau 9.2**). Les deux espèces les plus étudiées sont *Acropora tenuis* (30 cas) et *Acropora muricata* (12 cas). La fertilisation (15 cas) et le recrutement (15 cas) sont les réponses les plus souvent mesurées suivies par la densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 8 cas), la croissance (7 cas), la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (5 cas) et la mortalité (5 cas).

Les 37 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse narrative évaluent les effets d'une exposition à des microparticules de polyéthylène (21 cas), de polypropylène (9 cas) et de polystyrène (7 cas). Les réponses mesurées sont le développement embryonnaire (15 cas), la concentration en chlorophylle des algues symbiotiques (7 cas), l'expression des gènes ou l'activité enzymatique (6 cas), l'état de santé général (5 cas), l'extinction non photochimique (2 cas) et la composition en métabolites des tissus (2 cas).

9.5 Synthèse des résultats

Les **7 documents (36 études)** ayant alimenté les synthèses quantitative et narrative sont listés en Annexe C et le **Tableau 9.3** résume l'ensemble des résultats obtenus. Les résultats quantitatifs (d_i et intervalle de confiance à 95%) et narratifs sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Les résultats quantitatifs sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 9.1 à 9.6**. Certaines expériences ont été conduites dans des conditions acides pour les coraux (pH < 7.5).

En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à des microparticules de **polyéthylène**, de **polypropylène** et de **polystyrène** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées.

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 9.1 à 9.6**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. Il semble toutefois que cette analyse de risque sera limitée pour la catégorie des microplastiques. En effet, en prenant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par substance, type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études, aucun seuil de toxicité (plus haute concentration sans effet nocif) n'a pu être déterminé.

Tableau 9.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
Polyéthylène (P_eth)	9002-88-4
Polypropylène (P_prop)	9003-07-0
Polystyrène (P_sty)	9003-53-6

Tableau 9.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Fertilisation	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Croissance	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Autres outcomes
<i>Acropora tenuis</i> (Acr.ten)	15	15					15
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)			5	1	1	5	2
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)			2	2	1		6
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)			1				7
<i>Porites lutea</i> (Por.lut)				1	1		2
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Poc.ver)				1	1		2
<i>Heliopora coerulea</i> (Hel.coe)				1	1		2
<i>Montastraea cavernosa</i> & <i>Orbicella faveolata</i> (M.cav&O.fav)				1			
<i>Acropora millepora</i> & <i>Acropora humilis</i> & <i>Pocillopora damicornis</i> & <i>Pocillopora verrucosa</i> & <i>Porites cylindrica</i>							1
Total	15	15	8	7	5	5	37

Tableau 9.3. Résumé des résultats de la synthèse par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées.

Exposition	Fertilisation	Recrutement	Densité des algues symbiotiques	Croissance	Performance de la photosynthèse	Mortalité	Autres outcomes (synth. narrative)	Résumé
Polyéthylène	Oui	NS	Oui	Oui	NS	Oui	Oui	Oui
Polypropylène	Oui	NS					NS	Oui
Polystyrène			NS				Oui	Oui

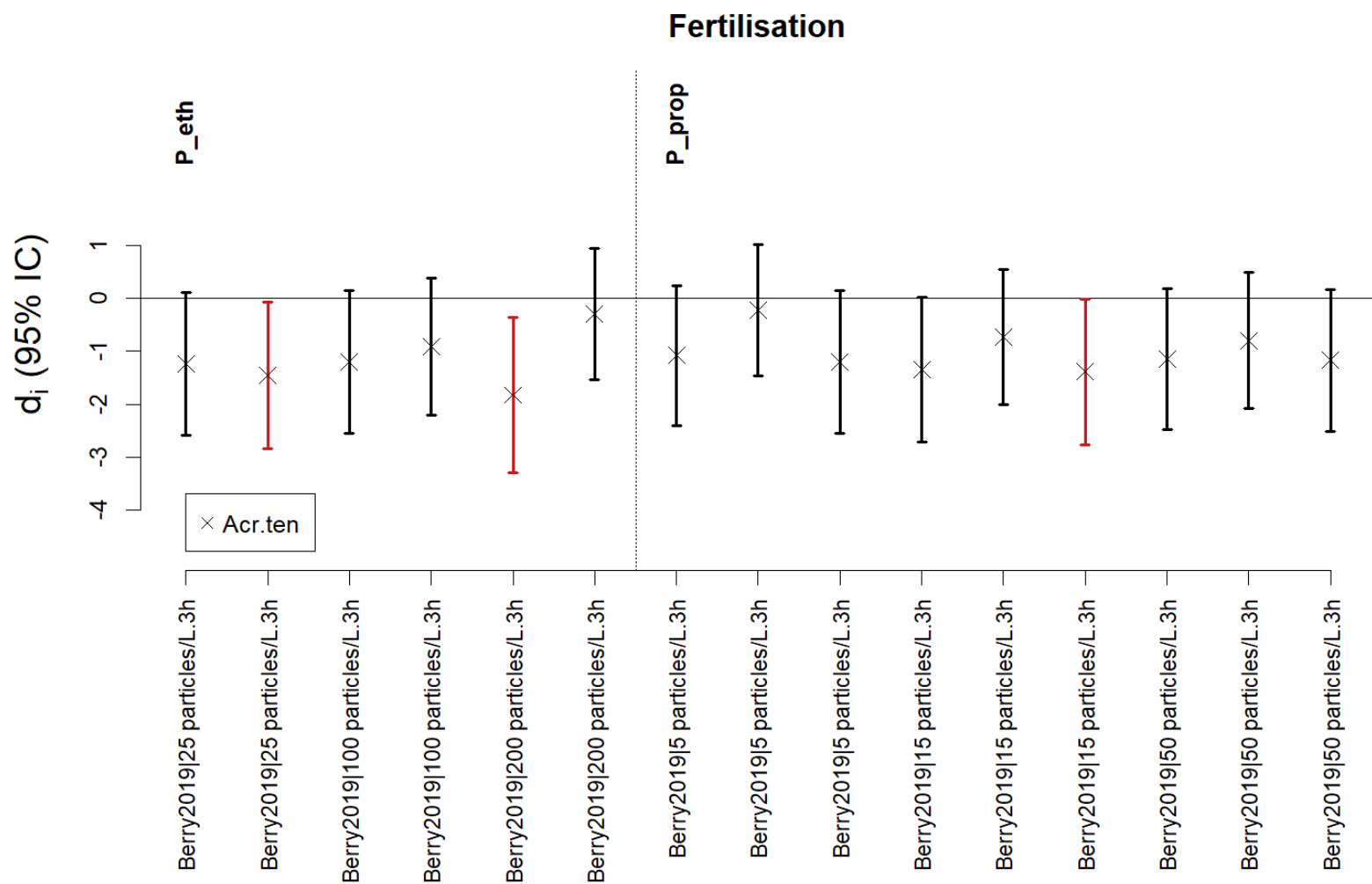


Figure 9.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur la fertilisation des coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

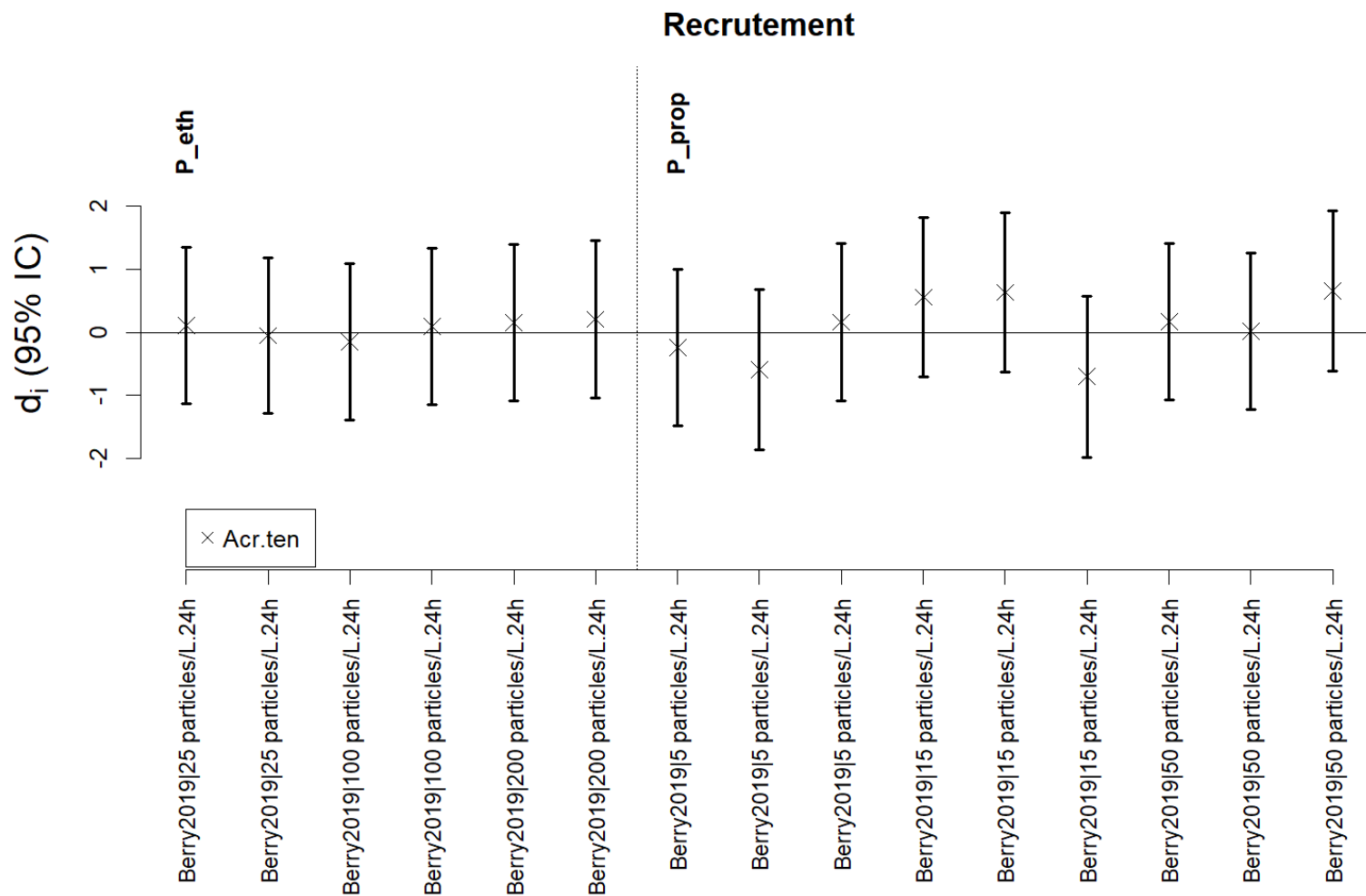


Figure 9.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur le recrutement des larves de coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Densité d'algues symbiotiques

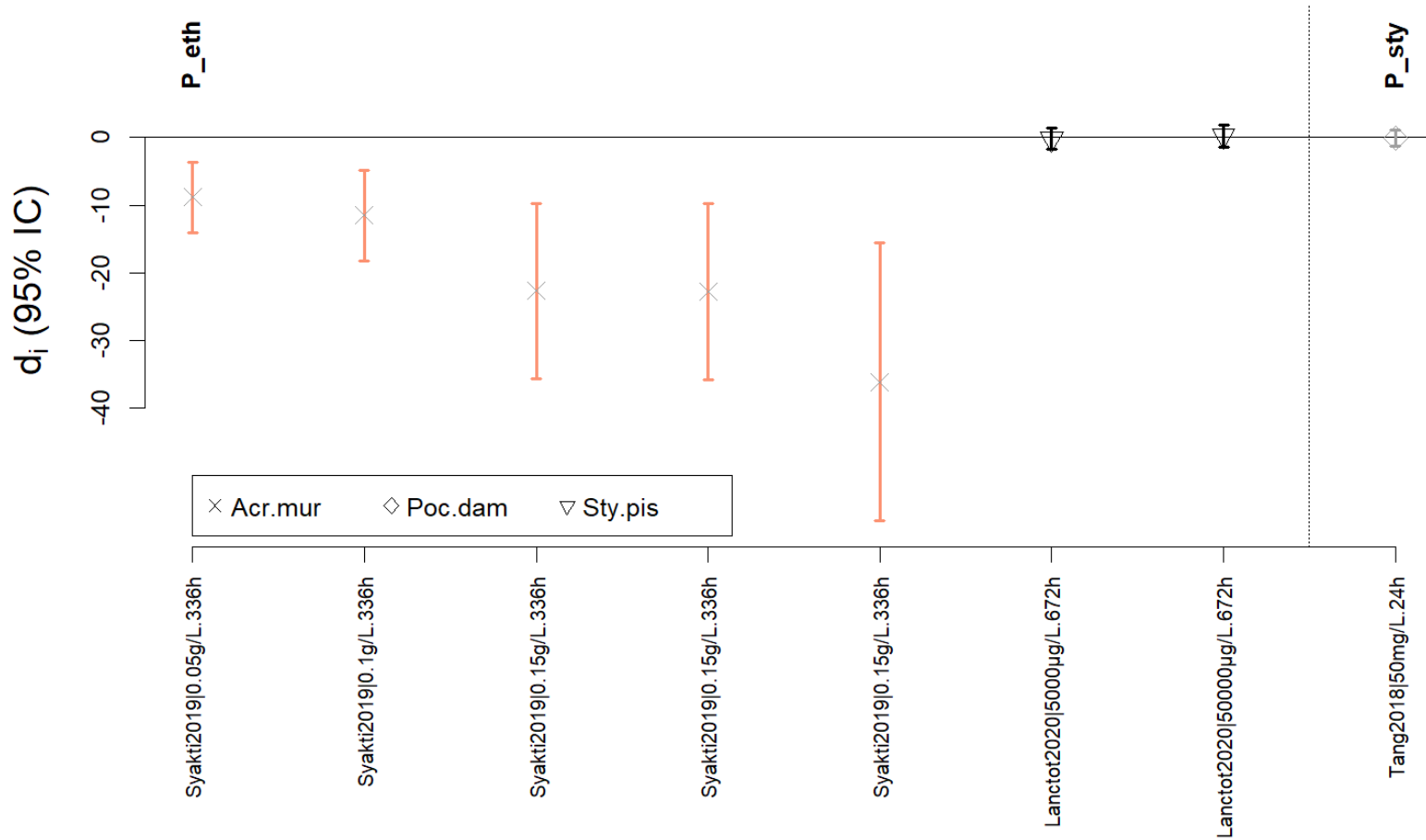


Figure 9.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C. Il faut noter que les résultats relatifs à l'espèce *Acropora muricata* (Acr.mur) ont été obtenus dans des conditions acides pour les coraux (pH = 7.32).

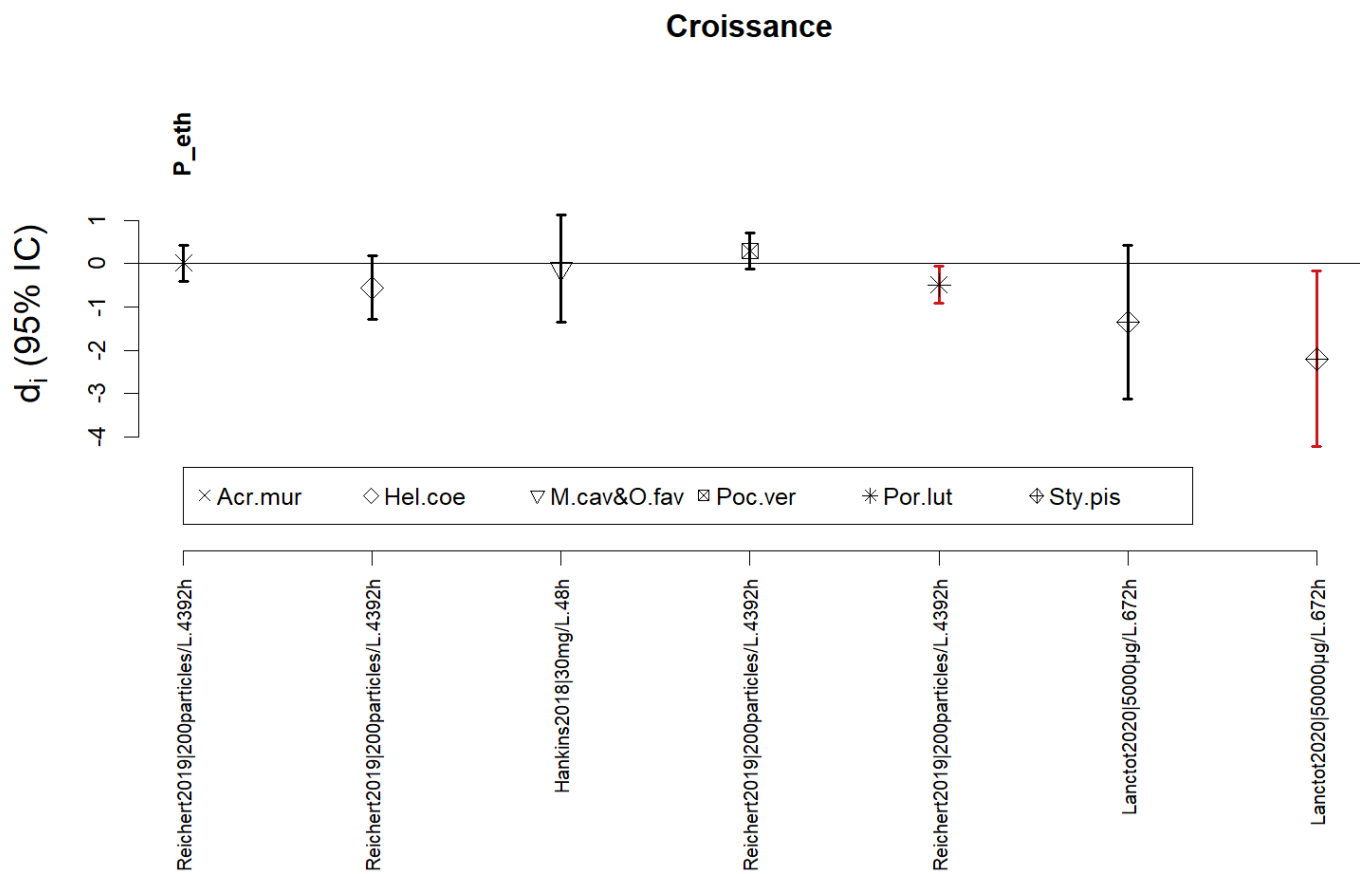


Figure 9.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C. Il faut noter que les résultats relatifs aux espèces Acr.mur, Hel.coe, Poc.ver et Por.lut ont été obtenus dans des conditions acides pour les coraux (pH = 6.3).

Performance de la photosynthèse

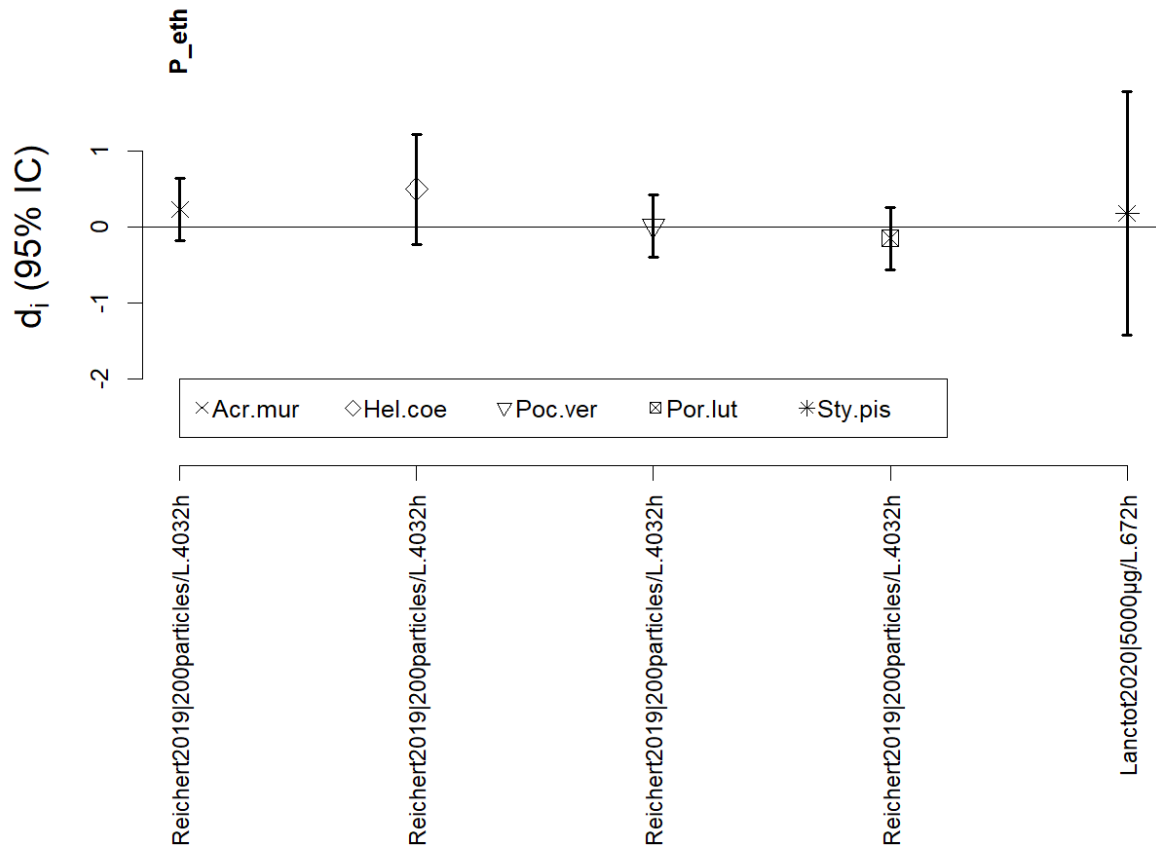


Figure 9.5. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C. Il faut noter que les résultats relatifs aux espèces Acr.mur, Hel.coe, Poc.ver et Por.lut ont été obtenus dans des conditions acides pour les coraux (pH = 6.3).

Mortalité



Figure 9.6. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des microplastiques sur la mortalité de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 9.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 9.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C. Il faut noter que les résultats relatifs à l'espèce *Acropora muricata* (Acr.mur) ont été obtenus dans des conditions acides pour les coraux (pH = 7.32).

Chapitre 10 Dispersants & Détergents

Ce chapitre présente la synthèse quantitative et narrative des résultats pour le groupe des **dispersants (dispersion des hydrocarbures)** et des **détergents**

10.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 82 études expérimentales correspondant à 16 documents traitent d'une exposition aux dispersants et détergents. Toutes ces études remplissaient les critères d'éligibilité de la revue.

10.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **82 études** a montré que :

- **14 études / 3 documents** avaient un niveau de **risque de biais fort** parce qu'il y avait potentiellement des différences initiales entre les groupes contrôle et traité (14 études).
- **47 études / 10 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** parce que les concentrations effectives d'exposition n'étaient pas mesurées (47 études) et parce qu'il n'y avait potentiellement pas de vraie réplication (4 études).
- **21 études / 4 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.⁶

10.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 68 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour 24 études cela n'a pas été possible car il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon).

Enfin, pour 2 études, les données ont été extraites mais il n'a pas été possible de calculer une différence de moyennes standardisée d_i car $S_{commune_i}$ était nulle.

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

10.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse est basée sur **42 études / 12 documents**, correspondant à **170 cas** de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative et **34 cas** pour la synthèse narrative (Annexe C). Les 12 documents sont des articles de revues scientifiques qui datent de 1983 à 2018.

⁶ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

Les 170 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative mesurent principalement les effets d'une exposition aux dispersants Corexit 9527 (24 cas) et Corexit 9500 (22 cas), à l'alkylbenzène sulfonate linéaire (14 cas), et aux dispersants Petrotech 25 (14 cas) et Inipol 90 (13 cas) (**Tableau 10.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 8 espèces différentes (**Tableau 10.2**), les deux espèces les plus étudiées étant *Stylophora pistillata* (74 cas) et *Acropora millepora* (64 cas). Le recrutement (80 cas) et la mortalité (76 cas) sont les réponses le plus souvent mesurées puis viennent la fertilisation (10 cas), la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (3 cas) et la croissance (1 cas).

Les 34 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse narrative mesurent les effets d'une exposition au dispersant Corexit 9527 (14 cas), à l'alkylbenzène sulfonate linéaire (10 cas) et à l'éthoxylate de nonylphénol (10 cas) (**Tableau 10.1**). Les réponses mesurées sont la croissance des tissus (20 cas), l'expression des gènes (12 cas), la contraction des polypes (1 cas) et la distribution des produits de la photosynthèse dans les tissus (1 cas).

10.5 Synthèse des résultats

Les **12 documents (42 études)** ayant alimenté les synthèses quantitative et narrative sont listés en Annexe C et le **Tableau 10.3** résume l'ensemble des résultats obtenus. Les résultats quantitatifs (d_i et intervalle de confiance à 95%) et narratifs sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Les résultats quantitatifs sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 10.1 à 10.4**. Une expérience a testé l'effet d'une exposition à l'alkylbenzène sulfonate linéaire avec l'effet combiné d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$).

Les dispersants et les détergents sont des produits contenant des agents de surface aux propriétés tensioactives. Ces deux catégories rassemblent donc des produits aux propriétés similaires qui se différencient uniquement par leur usage, les dispersants étant spécifiquement utilisés pour disperser les hydrocarbures. En considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à tous les dispersants étudiés (**Ardrox 6120, Bioreico R93, Biosolve, Corexit 9500, Corexit 9527, Dispolen 36S, Emulgal C100, Finasol OSR 52, Inipol 90, Petrotech PT125, Slickgone LTSW et Slickgone NS**) a entraîné un **effet négatif** sur les coraux au moins à certaines concentrations-durées. De la même manière, l'exposition aux trois détergents étudiés (**l'alkylbenzène sulfonate linéaire, l'éthoxylate de nonylphénol et le dodécylsulfate de sodium**) a entraîné un **effet négatif** sur les coraux au moins à certaines concentrations-durées.

Il faut noter que certains effets à première vue « positifs » d'une exposition à l'éthoxylate de nonylphénol sur la mortalité de *Pocillopora damicornis* (**Figure 10.2**) s'expliquent en réalité par une mortalité inhabituelle des coraux du groupe contrôle au début de l'expérience.

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 10.1 à 10.4**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. A titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif ont été déterminées pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Pour la catégorie des dispersants, six seuils ont pu être déterminés à partir d'études ayant un risque de biais moyen. Ils vont de 1 mg/L (Corexit 9527, fertilisation) à 5 mg/L (Slickgone NS,

recrutement), en passant par 1.25 mg/L (Ardrox 6120, Finasol OSR 52, Slickgone LTSW, recrutement) et 2.5 mg/L (Corexit 9500, recrutement). Pour la catégorie des détergents, quatre seuils ont pu être déterminés à partir d'études ayant un faible risque de biais : 0.75 mg/L pour l'alkylbenzène sulfonate linéaire (mortalité de *P. damicornis* et *Stylophora pistillata*) et 1 mg/L pour l'éthoxylate de nonylphénol (mortalité de *P. damicornis* et *S. pistillata*).

Tableau 10.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
Dispersant Ardrox 6120	
Dispersant Bioreico R93	
Dispersant Biosolve	
Dispersant Corexit 9500 (Corexit9500)	
Dispersant Corexit 9527 (Corexit9527)	
Dispersant Dispolen 36S	
Dispersant Emulgal C100	
Dispersant Finasol OSR 52	
Dispersant Inipol 90	
Dispersant Petrotech PT125	
Dispersant Slickgone LTSW	
Dispersant Slickgone NS	
Linear alkylbenzene sulfonates (household anionic surfactant detergent) (LAS)	85536-14-7
Nonylphenol ethoxylate (household non ionic detergent) (NPE)	9016-45-9
Sodium dodecyl sulphate (SDS)	151-21-3

Tableau 10.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces							Autres outcomes
	Recrutement	Mortalité	Fertilisation	Performance de la photosynthèse	Croissance	Densité des algues symbiotiques	
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)	20	54					10
<i>Acropora millepora</i> (Acr.mil)	54		10				
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)		12					10
<i>Orbicella franksi</i> (Orb.fra)							12
<i>Orbicella faveolata</i> (Orb.fav)	3	6					
<i>Porites astreoides</i> (Por.ast)	3	3					
<i>Pseudodiploria strigosa</i> (Pse.str)				1	1		2
<i>Pocillopora verrucosa</i> (Poc.ver)				2			
<i>Platygyra sinensis</i> (Pla.sin)		1					
Total	80	76	10	3	1		34

Tableau 10.3. Résumé des résultats de la synthèse par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées.

Exposition	Recrutement	Mortalité	Fertilisation	Performance de la photosynthèse	Croissance	Densité des algues symbiotiques	Autres outcomes (synth. narrative)	Résumé
Dispersant Ardrex 6120	Oui	Oui						Oui
Dispersant Bioreico R93	Oui	Oui						Oui
Dispersant Biosolve	Oui	Oui						Oui
Dispersant Corexit 9500	Oui	Oui						Oui
Dispersant Corexit 9527	Oui		Oui	NS	NS		Oui	Oui
Dispersant Dispolen 36S		Oui						Oui
Dispersant Emulgal C100	Oui	Oui						Oui
Dispersant Finasol OSR 52	Oui							Oui
Dispersant Inipol 90	Oui	Oui						Oui
Dispersant Petrotech PT125	Oui	Oui						Oui
Dispersant Slickgone LTSW	Oui							Oui
Dispersant Slickgone NS	Oui	NS						Oui
Linear alkylbenzene sulfonates		Oui		NS			Oui	Oui
Nonylphenol ethoxylate		Oui					NS	Oui
Sodium dodecyl sulphate	Oui							Oui

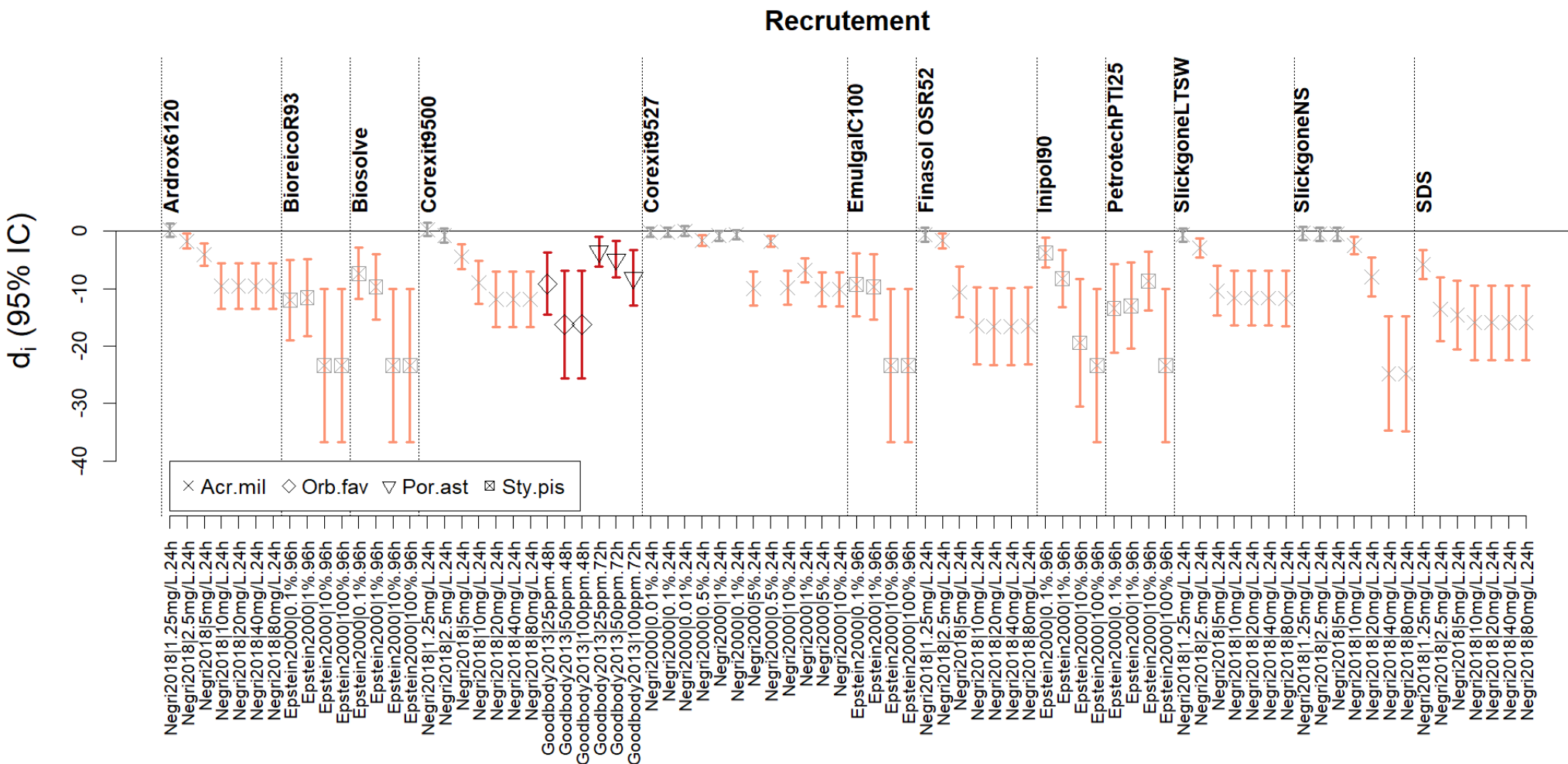


Figure 10.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des dispersants et détergents sur le recrutement des larves de coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 10.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 10.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

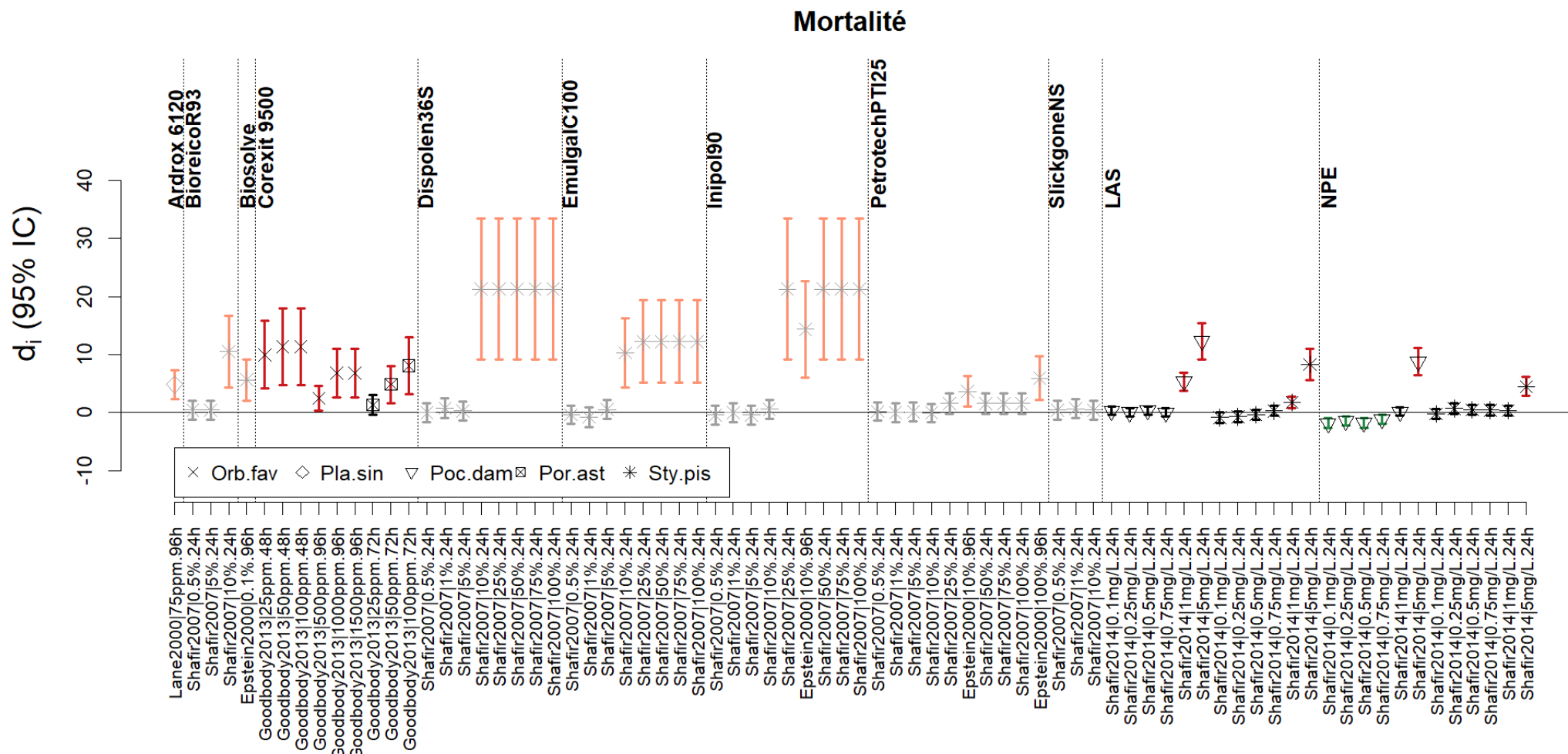


Figure 10.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des dispersants et détergents sur la mortalité de coraux adultes (études de Shafir et al. 2007 et 2014) et de larves de coraux (autres études). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 10.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 10.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

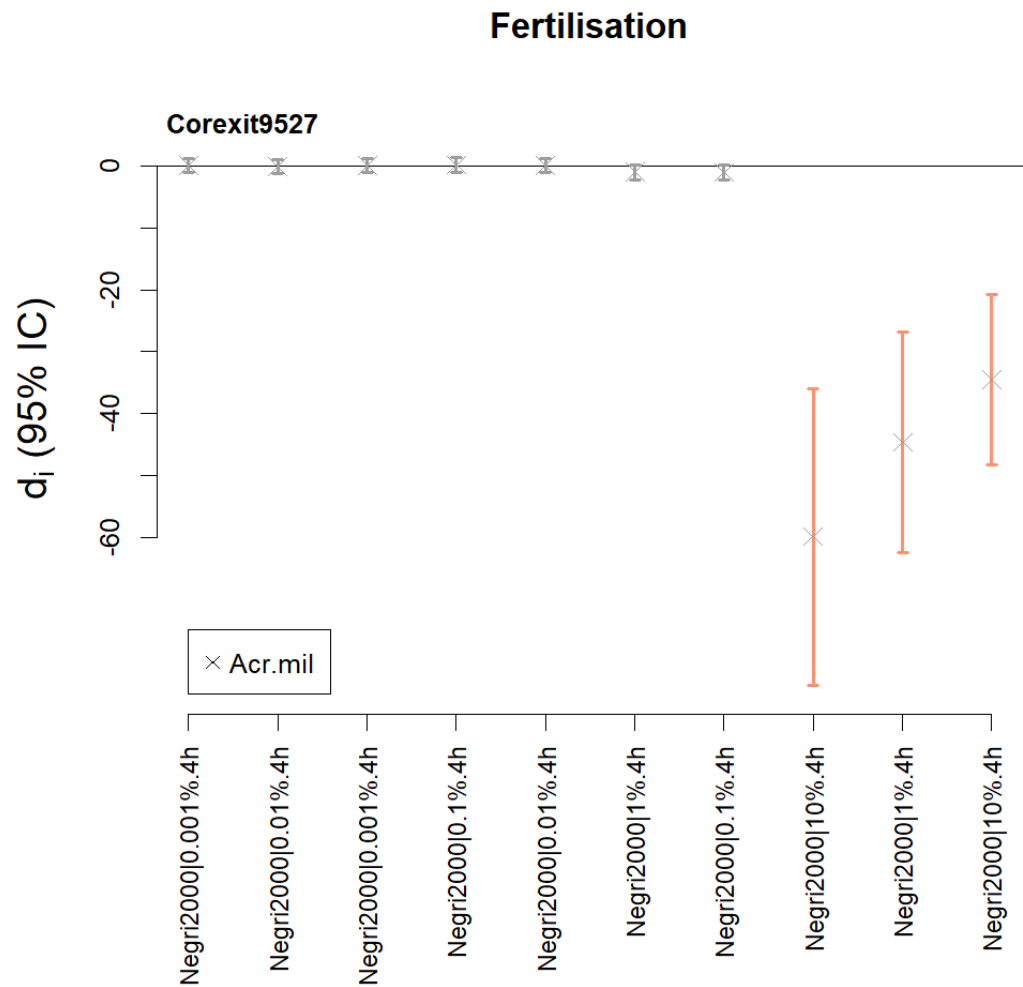


Figure 10.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des dispersants et détergents sur la fertilisation des coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 10.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 10.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

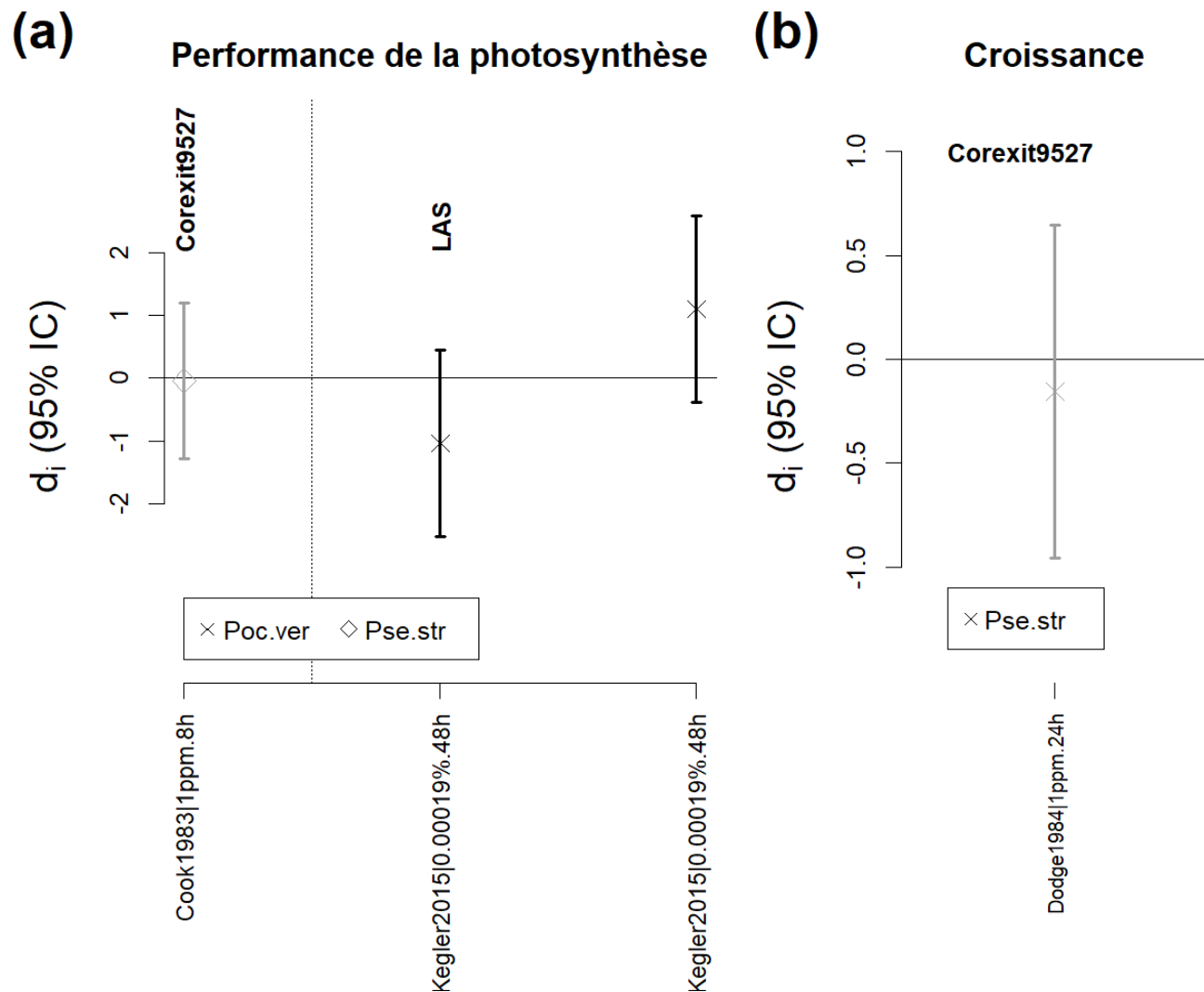


Figure 10.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des dispersants et détergents sur (a) la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes) et (b) la croissance (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 10.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 10.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Chapitre 11 Nanoparticules & autres substances

Ce chapitre présente la synthèse quantitative et narrative des résultats pour le groupe des **nanoparticules** et **toutes les autres substances** qui n'ont pas pu être classées dans les catégories précédentes.

11.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données et au sein du *knowledge cluster* (4) « Effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux », 108 études expérimentales correspondant à 24 documents traitent d'une exposition aux nanoparticules et aux « autres substances », mais 33 études ont été exclues car il n'y avait pas de groupe contrôle (20 études) ou parce que l'exposition était combinée à une exposition à des macroparticules (13 études).

11.2 Robustesse des études

L'analyse de la robustesse des **75 études** a montré que :

- **7 études / 2 documents** avaient un niveau de **risque de biais fort** parce qu'il y avait potentiellement des différences initiales entre les groupes contrôle et traité (5 études) ou qu'il y avait des facteurs confondants.
- **49 études / 14 documents** avaient un niveau de **risque de biais moyen** principalement parce qu'il n'y avait pas de vraie réplication (22 études) et parce que les concentrations effectives d'exposition n'étaient pas mesurées (39 études).
- **19 études / 3 documents** avaient un niveau de **risque de biais faible**.⁷

11.3 Extraction des résultats

L'extraction des données a été tentée pour les 68 études ayant un niveau de risque de biais faible ou moyen, mais pour certaines études cela n'a pas été possible car :

- il n'y avait pas les données nécessaires (pas de test statistique, pas de moyenne pour les groupes contrôle et traité et/ou d'indication de la taille de l'échantillon, 15 études) ;
- les données étaient redondantes avec des données déjà extraites (un proxy plus précis était disponible, 2 études) ;
- l'exposition était associée à un stress supplémentaire autre que la température ou l'acidification (par ex. une exposition aux UV ou une baisse de la salinité) (10 études) ;
- les études étaient des erreurs de metacoding (11 études).

La liste de toutes les études écartées de la synthèse est fournie en Annexe B avec la raison d'exclusion.

⁷ Un même document peut inclure plusieurs études avec des niveaux de risque de biais différents.

11.4 Description des études alimentant la synthèse

La synthèse est basée sur **30 études / 12 documents**, correspondant à **67 cas** de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative et **50 cas** pour la synthèse narrative (Annexe C). Les 12 documents sont des articles de revues scientifiques qui datent de 1998 à 2020.

Les 67 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse quantitative mesurent principalement les effets d'une exposition à des nanoparticules (19 cas) et à des cryoprotectants (diméthyl sulfoxyde, éthylène glycol, glycérol, glycoaldehyde, méthanol, 32 cas) (**Tableau 11.1**). Les expérimentations ont été réalisées sur 6 espèces différentes (**Tableau 11.2**), les deux espèces les plus étudiées étant *Pocillopora damicornis* (36 cas) et *Stylophora pistillata* (11 cas). La mortalité (36 cas) et la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (14 cas) sont les réponses les plus souvent mesurées suivies par la densité d'algues symbiotiques (blanchissement, 8 cas), la fertilisation (4 cas), la croissance (4 cas) et le recrutement (1 cas).

Les 50 cas de concentration-durée d'exposition pour la synthèse narrative mesurent notamment les effets d'une exposition à des nanoparticules (9 cas), à des cryoprotectants (diméthyl sulfoxyde, éthylène glycol, glycérol, glycoaldehyde, méthanol, 25 cas), à des constituants de munitions (1,3,5-trinitro-1,3,5 triazine, 6 cas) et à des polychlorobiphényles (PCBs, 6 cas) (**Tableau 11.1**). Les réponses mesurées sont l'état de balles tissulaires (20 cas), l'expression des gènes ou l'activité enzymatique (17 cas), la respiration du corail (6 cas), la croissance des tissus (4 cas) et la concentration en chlorophylle des algues symbiotiques (3 cas).

11.5 Synthèse des résultats

Les **12 documents (30 études)** ayant alimenté les synthèses quantitative et narrative sont listés en Annexe C et le **Tableau 11.3** résume l'ensemble des résultats obtenus. Les résultats quantitatifs (d_i et intervalle de confiance à 95%) et narratifs sont fournis au format Excel en Annexe C avec les caractéristiques des expériences (ex. température, stade de développement, et les concentrations effectives quand elles ont été mesurées). Les résultats quantitatifs sont visuellement présentés ci-après dans les **Figures 11.1 à 11.4**. Certaines expériences ont testé l'effet d'une exposition aux substances avec l'effet combiné d'une élévation de la température ($\geq 30^\circ\text{C}$).

Pour la catégorie des nanoparticules, en considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à des **nanoparticules d'argent**, des **quantum dots de Cadmium-Selenium-Zinc-Soufre** ou à des **capteurs de radicaux libres (TEMPOL)** a entraîné un **effet négatif** sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour une exposition au **polymère redox MeO-PEG-b-PMOT** et aux **nanoparticules de dioxyde de titane**, pour les concentrations-durées testées. Il a également été observé qu'une exposition à certaines concentrations-durées de polymère redox MeO-PEG-b-PMOT associé à des capteurs de radicaux libres (TEMPOL) préserve les coraux des effets délétères de hautes températures (effet positif, **Figure 11.1**).

Pour les substances non classées dans les catégories précédentes (« autres substances »), en considérant toutes les études quel que soit le niveau de risque de biais (faible ou moyen), l'exposition à l'**1,3,5-trinitro-1,3,5 triazine**, au **butylparabène**, à l'**émétine**, au **glycolaldéhyde**, au **rouge de ruthénium**, et à un **mélange de cytochalasine B et de colchicine** a entraîné un **effet négatif** sur les

coraux et/ou leurs algues symbiotiques au moins à certaines concentrations-durées. L'exposition de balles tissulaires de coraux à des **cryoprotectants (diméthyl sulfoxyde, éthylène glycol, glycérol et méthanol)** a également entraîné un **effet négatif** sur la survie et la taille des balles tissulaires, à certaines concentrations-durées.

En revanche, **aucun effet négatif statistiquement significatif** n'a été observé pour une exposition à l'**éthylparabène**, à des **polychlorobiphényles**, à des **hexabromocyclododécane**s (retardateurs de flammes) et du **lixiviat de polystyrène**, pour les concentrations-durées testées.

Certains effets à première vue « positifs » observés (DMSO, éthylène glycol, éthylparabène, hexabromocyclododécane) peuvent s'expliquer par une absence d'effet de l'exposition et de la variabilité naturelle des réponses, entraînant une valeur plus faible dans le groupe contrôle que dans le groupe traité. Des variations de conditions de laboratoire peuvent également expliquer ces résultats, dans le cas de l'éthylparabène par exemple, les auteurs de l'étude évoquent la possibilité d'un effet « aquarium » sur les coraux (disponibilité en nutriments, mouvement de l'eau).

Enfin, des seuils de toxicité (ex. la concentration testée la plus élevée pour laquelle aucun effet significativement différent du groupe contrôle n'a été observé) peuvent être calculés à partir des effets présentés dans les **Figures 11.1 à 11.4**. Ces seuils, croisés avec les concentrations d'exposition dans le milieu, permettront d'identifier les substances qui représentent un risque pour les coraux. A titre illustratif, les plus hautes concentrations sans effet nocif ont été déterminées pour les substances ayant un minimum de 5 concentrations-durées testées (exposition simple) par type de réponse, espèce, stade de développement, conditions de température et de pH, et niveau de risque de biais des études. Pour la catégorie des nanoparticules, aucun seuil n'a pu être déterminés. Pour la catégorie « autres substances », deux seuils ont pu être déterminés à partir d'études ayant un risque de biais moyen et mesurant la mortalité de balles tissulaires après exposition au diméthyl sulfoxyde et à l'éthylène glycol comme cryoprotecteurs. Mais ces études particulières ne sont pas très pertinentes pour l'estimation de la toxicité.

Tableau 11.1. Liste des expositions testées et abréviations utilisées dans le texte et les figures en gras, et numéro CAS.

Exposition	CAS
Nanoparticules :	
CdSe/ZnS quantum dots coated by a positively charged polymer (4.7nm) (CdSE/ZnS)	
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT (polymer)	
4-hydroxy-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl ROS scavengers (TEMPOL) (ROS scavenger)	2226-96-2
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT with ROS scavengers (polymer & ROS_sc)	
Silver nanocolloids (nano-Ag)	
Titanium dioxide nanoparticles (<25 nm) (nano-TiO2)	
Autres substances :	
1,3,5-trinitro-1,3,5 triazine (RDX)	121-82-4
Butylparaben	94-26-8
Dimethyl sulfoxide (cryoprotectant) (DMSO)	67-68-5
Emetin	483-18-1
Ethylene glycol (cryoprotectant)	3775-85-7
Ethylparaben	120-47-8
Glycerol (cryoprotectant)	56-81-5
Glycolaldehyde (Glycolald.)	141-46-8
Methanol (cryoprotectant)	67-56-1
Polychlorinated biphenyls (Aroclor 1254) (PCB)	11097-69-1
Ruthenium red (ruthenium)	11103-72-3
Hexabromocyclododecanes (HBCDD)	25637-99-4
Polystyrene leachate (P_sty.leach)	
CytochalasinB & colchicine (CytoB & colch)	

Tableau 11.2. Nom des espèces de coraux étudiées avec l'abréviation utilisée dans les figures et le nombre de cas par variable mesurée.

Espèces	Mortalité	Performance de la photosynthèse	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation	Croissance	Recrutement	Autres outcomes
<i>Pocillopora damicornis</i> (Poc.dam)	24	7	3		2		27
<i>Stylophora pistillata</i> (Sty.pis)		7	2		2		11
<i>Acropora japonica</i> (Acr.mur)	4			4		1	3
<i>Acropora tenuis</i> (Acr.ten)	8						1
<i>Acropora muricata</i> (Acr.mur)			1				6
<i>Orbicella faveolata</i> (Orb.fav)			2				2
Total	36	14	8	4	4	1	50

Tableau 11.3. Résumé des résultats de la synthèse par type d'exposition et variable mesurée. « Oui » indique qu'au moins un effet statistiquement significatif négatif pour les coraux et/ou leurs algues symbiotiques a été observé à une certaine concentration-durée, et « NS » qu'aucun effet statistiquement significatif négatif n'a été observé aux concentration-durée testées. Le résultat « NS+ » indique que ce n'est pas la toxicité qui a été évaluée mais la capacité de la substance à préserver les coraux des effets délétères de hautes températures (voir Annexe C).

Exposition	Mortalité	Performance de la photosynthèse	Densité des algues symbiotiques	Fertilisation	Croissance	Recrutement	Autres outcomes (synth. narrative)	Résumé
Nanoparticules :								
CdSe/ZnS quantum dots coated by a positively charged polymer (4.7nm)							Oui	Oui
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT	NS							NS
4-hydroxy-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl ROS scavengers (TEMPOL)	Oui							Oui
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT with ROS scavengers	NS+						NS+	NS+
Silver nanocolloids	Oui			Oui		Oui	Oui	Oui
Titanium dioxide nanoparticles (<25 nm)			NS				NS	NS
Autres substances :								
1,3,5-trinitro-1,3,5 triazine			NS				Oui	Oui
Butylparaben		Oui						Oui
Dimethyl sulfoxide (cryoprotectant)	Oui						Oui	Oui
Emetin					Oui			Oui
Ethylene glycol (cryoprotectant)	Oui						Oui	Oui
Ethylparaben		NS						NS
Glycerol (cryoprotectant)	Oui						Oui	Oui
Glycolaldehyde		Oui	NS				Oui	Oui
Methanol (cryoprotectant)	Oui						Oui	Oui
Polychlorinated biphenyls (Aroclor 1254)		NS					NS	NS
Ruthenium red		Oui			Oui		Oui	Oui
Hexabromocyclododecanes		NS	NS				NS	NS
Polystyrene leachate		NS	NS				NS	NS
CytochalasinB & colchicine					Oui			Oui

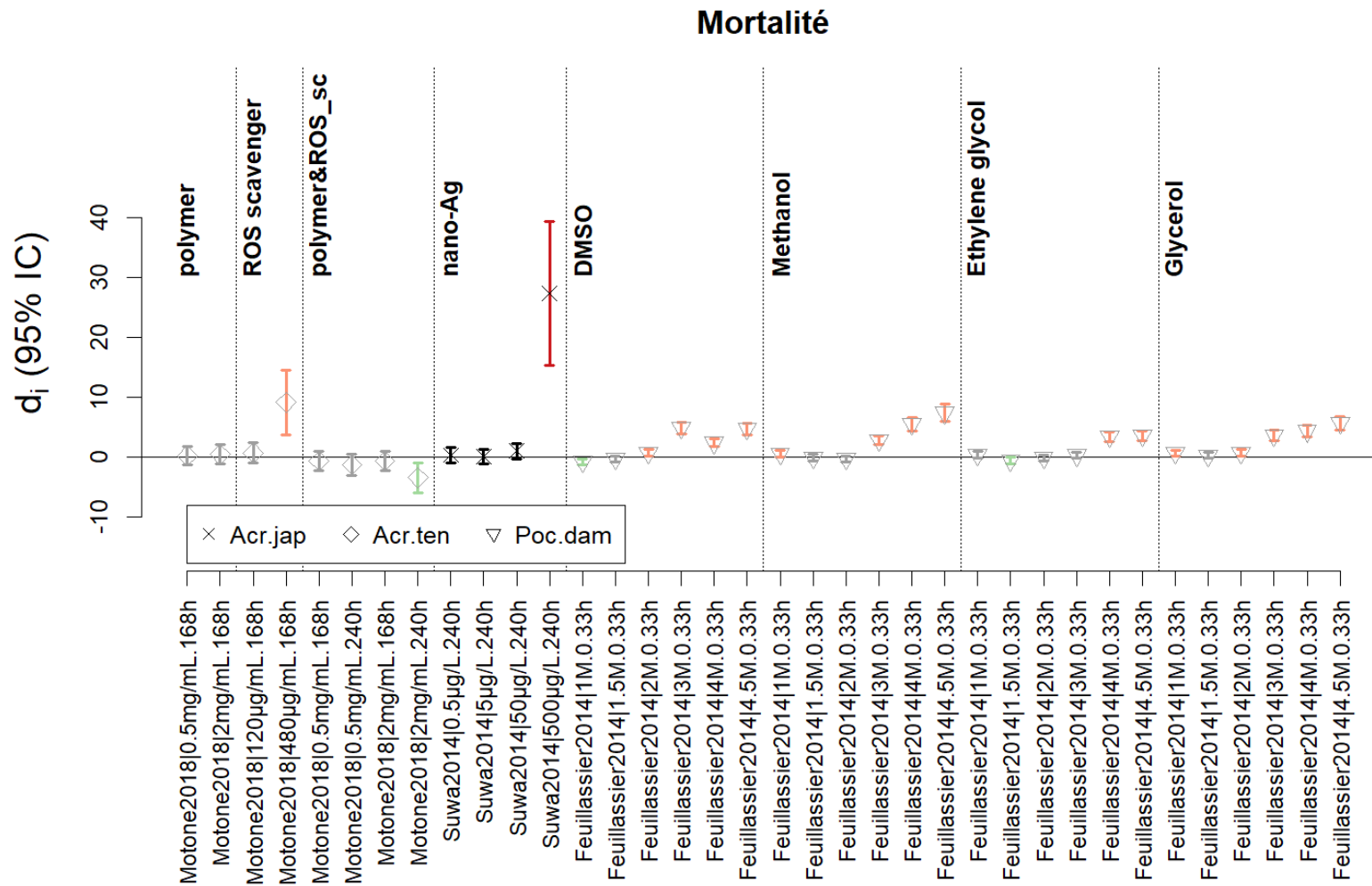


Figure 11.1. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des nanoparticules sur la mortalité de larves de coraux et de cryoprotectants sur la mortalité de balles tissulaires de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 11.1** pour la légende) et par espèce et concentration × durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 11.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

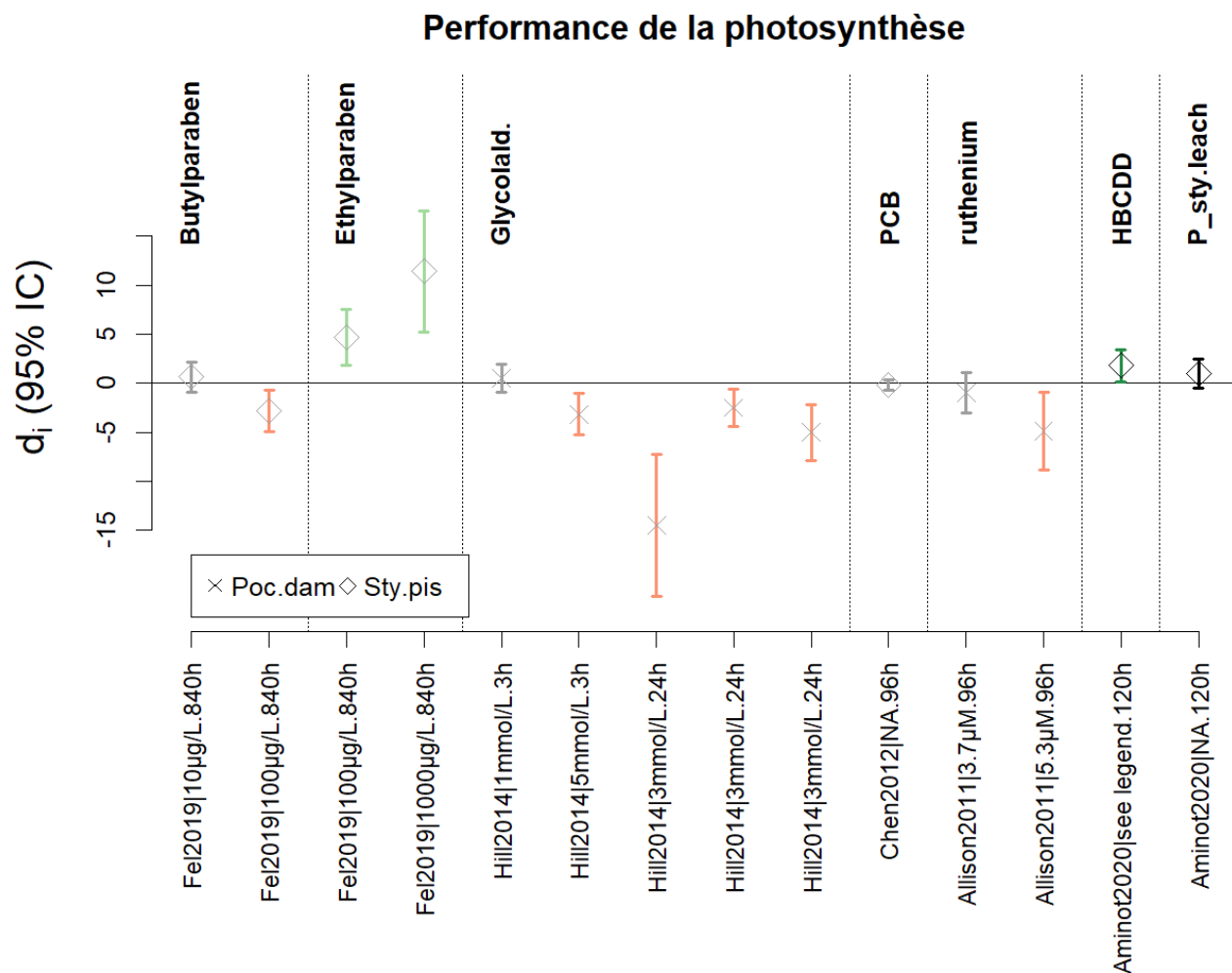


Figure 11.2. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des substances non classées dans les catégories précédentes sur la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques (coraux adultes). Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 11.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 11.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance verts indiquent une d_i significativement différente de 0 avec un effet a priori « positif » pour le corail. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C. La concentration d'exposition pour HBCDD est 220 ng/L alpha-HBCDD & 25 ng/L beta-HBCDD & 2 ng/L gamma-HBCDD.

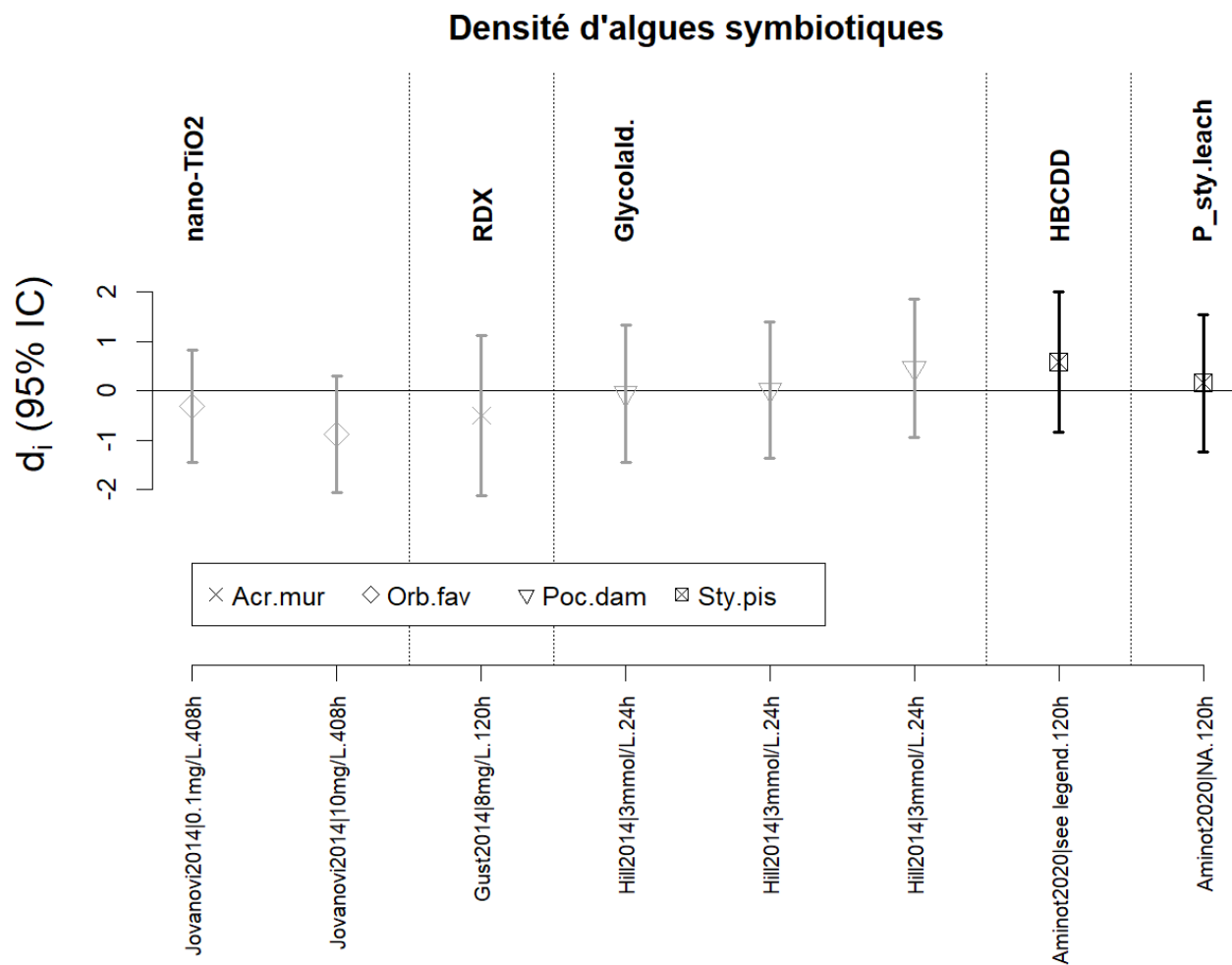


Figure 11.3. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet des nanoparticules et des substances non classées dans les catégories précédentes sur la densité des algues symbiotiques (blanchissement) de coraux adultes. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 11.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 11.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

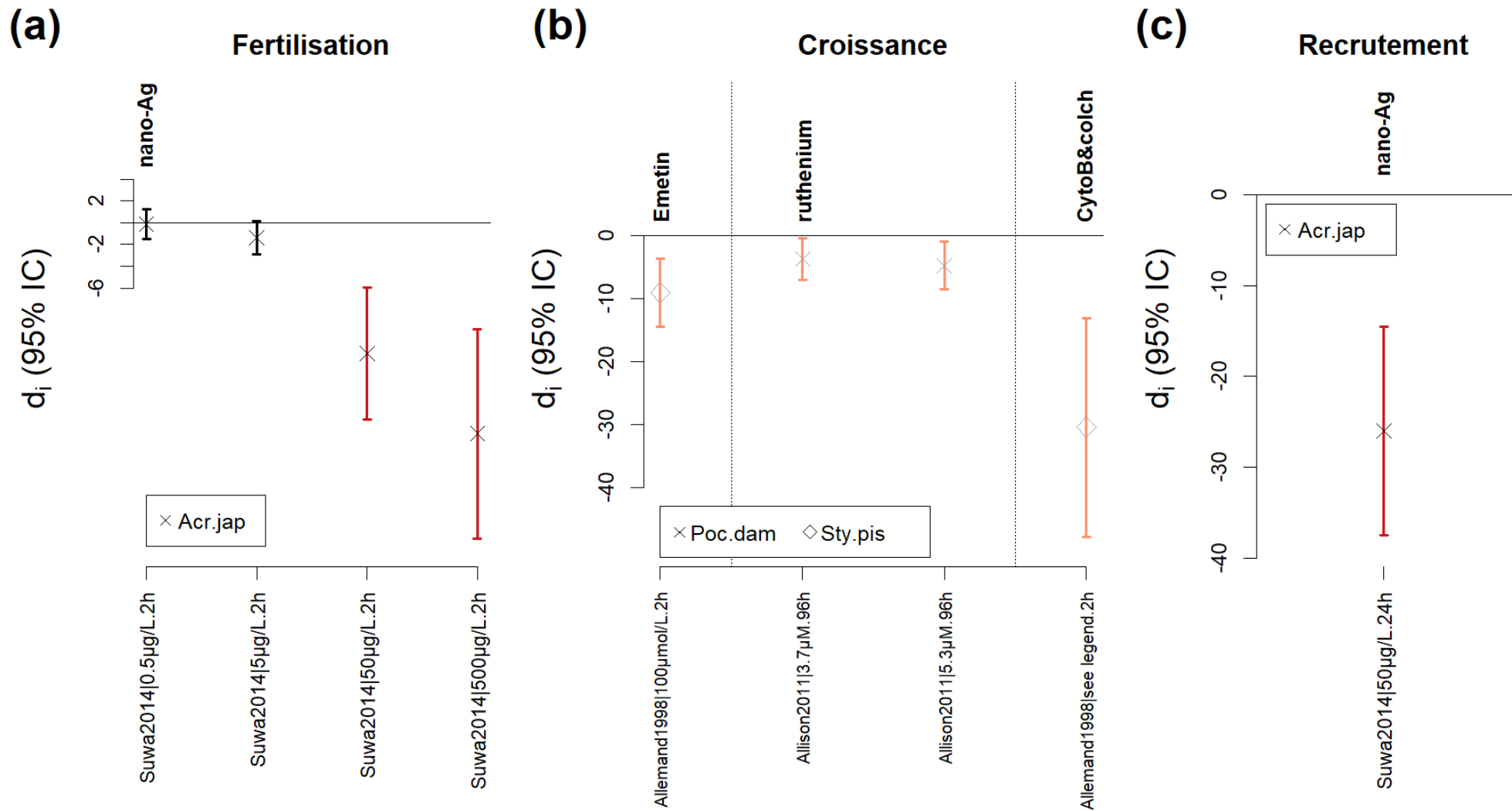


Figure 11.4. Différence de moyennes standardisée (d_i) et intervalle de confiance à 95% pour l'effet **(a)** des nanoparticules sur la fertilisation des coraux ; **(b)** des substances non classées dans les catégories précédentes sur la croissance (coraux adultes) ; **(c)** des nanoparticules sur le recrutement des larves de coraux. Les valeurs sont ordonnées par exposition (voir **Tableau 11.1** pour la légende) et par espèce et concentration \times durée d'exposition au sein de chaque espèce (voir le **Tableau 11.2** pour la légende des espèces). Les points noirs et gris indiquent les études ayant un risque de biais faible et moyen, respectivement. Les intervalles de confiance rouges et oranges indiquent une d_i significativement différente de 0 pour les études à risque de biais faible et moyen, respectivement. Les caractéristiques des expériences y compris les concentrations effectives mesurées sont indiquées en Annexe C.

Chapitre 12 Conclusion

La revue systématique sur les effets écotoxicologiques des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux a rassemblé une grande quantité d'information sur le sujet : **655 études issues de 148 documents et couvrant 9 catégories de substances ont été synthétisées (Tableau 12.1)**. Cette abondante littérature cache cependant des disparités fortes entre les catégories de substances et entre les substances au sein de chaque catégorie.

La **synthèse quantitative** a permis de constituer une base de données des effets des substances chimiques sur six paramètres biologiques des coraux constructeurs de récifs tropicaux et de leurs algues symbiotiques (2346 cas d'étude, Annexe C). Ces 6 paramètres – la fertilisation des gamètes, le recrutement des larves, la croissance et la mortalité, la densité et la performance de la photosynthèse des algues symbiotiques – permettent d'évaluer les effets létaux et sub-létaux des substances et de couvrir l'ensemble du cycle de développement du corail et son algue symbiotique. Cette synthèse quantitative rapporte l'effet de 138 expositions différentes (substances ou mélange de substances), le **cuivre** étant la substance la plus-représentée avec 311 cas d'étude (13.3 % des cas), suivi du **diuron** (166 cas, 7.1 %) et du **pétrole brut** (« *crude oil* », 106 cas, 4.5 %) (**Tableau 12.2**). Les expositions ont été testées sur 61 espèces de corail différentes, mais principalement sur *Acropora millepora* (371 cas d'étude, 15.8 % des cas), *Acropora tenuis* (323 cas, 13.8 %), *Pocillopora damicornis* (287 cas, 12.2 %) et *Stylophora pistillata* (269 cas, 11.5 %). Plus de la moitié des expositions (82/138) ont été testées sur une seule espèce uniquement (**Tableau 12.2**). La réponse la plus souvent mesurée est le recrutement (552 cas d'étude, 23.5% des cas) mais il peut y avoir des disparités fortes de réponse mesurée selon les catégories de substances (**Figure 12.1**). Pour les catégories de substances ayant relativement peu d'information, la synthèse quantitative a été complétée par une synthèse narrative des effets des substances sur les coraux (**Tableau 12.1**) qui a considéré toutes les réponses (ex. expression des gènes, activité enzymatique, rétraction des polypes) (Annexe C).

D'une manière générale, la plupart des substances étudiées ont entraîné un effet statistiquement négatif sur les coraux et/ou leurs algues symbiotiques à certaines concentrations-durées d'exposition. Les concentrations d'exposition induisant un effet toxique peuvent être parfois très élevées et la toxicité trouvée pourrait donc se révéler irréaliste par rapport aux concentrations qu'il est possible de retrouver dans le milieu naturel. A l'inverse, les durées d'exposition en laboratoire sont majoritairement de courte durée (65 % des cas d'étude ont une durée d'exposition inférieure ou égale à 48h et 6% ont une durée d'exposition supérieure à un mois) et l'absence de réponse des coraux lors d'une exposition de courte durée à certaines concentrations de substances ne présage pas de l'effet d'une exposition chronique en milieu naturel.

Cette revue systématique des effets des substances chimiques sur les coraux constructeurs de récifs tropicaux et sa base de données associée (Annexe C) permet de mettre à disposition des gestionnaires une partie des informations nécessaires à l'évaluation des risques écologiques des substances chimiques, évaluation qui croise les informations sur la toxicité d'une substance et l'exposition des milieux naturels à cette substance. La base de données permet d'évaluer la toxicité des substances et de la contextualiser grâce aux informations sur la robustesse des études, les conditions expérimentales des expériences (e.g. température, pH, concentrations effectives d'exposition quand elles sont mesurées) et les organismes testés (incluant le stade de développement). Cette base de données sera aussi utile aux chercheurs en écotoxicologie corallienne notamment pour déterminer les gammes de concentration d'exposition à tester et orienter les recherches vers les substances, espèces ou réponses pour lesquelles il manque des connaissances.

Tableau 12.1. Nombre d'études et de documents inclus dans la revue systématique par catégorie de substance. Les études testant des expositions combinées de substances appartenant à des catégories différentes sont incluses dans les synthèses de chaque catégorie.

Catégorie de substances	Nombre d'études (documents) dans la synthèse		
	quantitative	narrative	total
Métaux	154 (47)	[non traité]	154 (47)
Pesticides	130 (33)	[non traité]	130 (33)
Hydrocarbures	107 (28)	[non traité]	107 (28)
Filtres ultraviolets	35 (6)	12 (5)	46 (9)
Pharmaceutiques	30 (9)	25 (10)	55 (13)
Microplastiques	19 (6)	17 (5)	36 (7)
Dispersants	28 (8)	3 (3)	31 (10)
Détergents	7 (3)	4 (1)	11 (3)
Nanoparticules	5 (3)	4 (4)	9 (4)
Autres substances	13 (8)	9 (6)	21 (8)
Métaux & Hydrocarbures	2 (1)	[non traité]	2 (1)
Métaux & Nutriments	10 (2)	[non traité]	10 (2)
Métaux & Pesticides	10 (3)	[non traité]	10 (3)
Hydrocarbures & Dispersants	33 (10)	[non traité]	33 (10)
Total	583 (137)	74 (33)	655 (148)

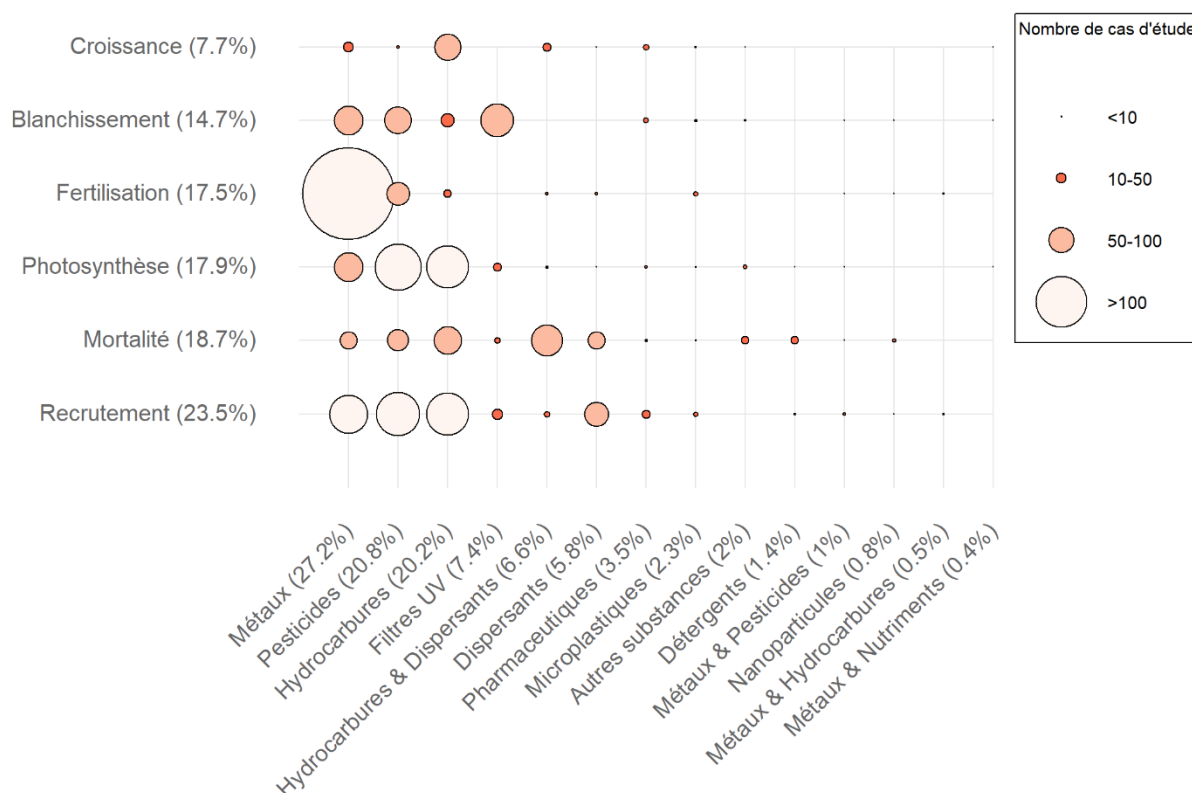


Figure 12.1. Nombre de cas d'étude par catégories de substance et de réponse mesurée. La taille et la couleur des points indique le nombre de cas d'étude pour chaque croisement de catégories. Le blanchissement est la diminution de la densité d'algues symbiotiques.

Tableau 12.2. Résumé de l'information disponible dans la synthèse quantitative pour chacune des 138 expositions recensées : nombre de cas d'étude total (Nb cas) et par type de réponse mesurée (fertilisation des gamètes (Fer.), recrutement des larves (Rec.), croissance (Cro.) et mortalité (Mor.), densité (Bla.) et performance de la photosynthèse (Pho.) des algues symbiotiques ; (*) indique qu'au moins un cas avait un effet statistiquement négatif ; nombre d'espèces (S) sur lesquelles l'exposition a été testée. Les expositions sont organisées par catégories d'exposition, se référer aux chapitres correspondants pour plus de détails.

Exposition	Nb cas	Réponse						S
		Fer.	Rec.	Cro.	Mor.	Bla.	Pho.	
Métaux (Chapitre 4)								
Cu	311	116(*)	60(*)	6(*)	28(*)	46(*)	55(*)	23
Pb	55	28(*)	.	.	11(*)	6(*)	10(*)	4
Mn	43	32(*)	.	2	5(*)	2	2	3
Ni	34	13(*)	2	7	.	6(*)	6	5
Fe	33	13(*)	.	3(*)	3(*)	10(*)	4	5
Zn	28	11(*)	.	6(*)	.	9(*)	2	6
Al	20	7(*)	13(*)	.	.	.	.	1
Ga	20	7(*)	13(*)	.	.	.	.	1
V	19	7(*)	12(*)	.	.	.	.	1
Co	16	6	.	5(*)	.	.	5	3
Cd	15	13(*)	.	.	.	2(*)	.	4
Hg	4	.	.	.	1	3(*)	.	1
Si	4	.	.	.	4(*)	.	.	1
Fe & Mn	6	.	.	2	.	2	2	1
Co & Ni	5	5	.	.	.	.	.	1
Alumina refinery wastewater (Al, V, Ga, As, Mo, Ni, Zn, U)	24	12(*)	12(*)	.	.	.	.	1
Pesticides (Chapitre 5)								
Diuron	166	15	18(*)	6(*)	41(*)	20(*)	66(*)	12
Permethrin	36	5	16(*)	.	6(*)	7(*)	2	2
Cyanide	32	.	.	.	.	14(*)	18(*)	4
Irgarol 1051	31	.	12(*)	.	.	7(*)	12(*)	6
Chlorpyrifos	25	12(*)	10(*)	.	.	1	2	2
Tributyltin	25	6(*)	6(*)	3(*)	.	3	7(*)	3
Atrazine	21	6	1	.	2	4	8(*)	3
Carbaryl	18	5	10(*)	.	.	1	2	1
Dibrom	18	.	6	.	6(*)	6	.	1
Endosulfan	18	5	10(*)	.	.	1(*)	2	1
MEMC	18	5(*)	10(*)	.	.	1(*)	2(*)	1
Profenofos	18	5	10(*)	.	.	1	2	1
Chlorpyrifos oxon	15	5	10(*)	.	.	.	.	1
Hexazinone	12	.	.	.	.	4(*)	8(*)	1
VectoBac G (bacterial insecticide)	12	.	6	.	6	.	.	2
Glyphosate	8	.	.	.	.	8	.	1
VectoLex G (bacterial insecticide)	6	.	3	.	3	.	.	1
Dichlorvos	3	.	.	.	.	3(*)	.	1
Monuron	3	.	.	.	.	.	3(*)	1
2,4-D	2	.	.	.	.	.	2(*)	1
Cycloheximide	1	.	.	1(*)	.	.	.	1
Hydrocarbures (Chapitre 6)								
1-methylnaphthalene	80	.	.	32(*)	14(*)	.	34(*)	6
Phenanthrene	58	.	6(*)	20(*)	12(*)	.	20(*)	5
Toluene	32	.	9(*)	9(*)	4(*)	.	10(*)	6
Benzene	15	.	15(*)	.	.	.	.	2
Anthracene	13	.	6(*)	.	7(*)	.	.	1
Benzo(a)pyrene	9	.	.	.	1(*)	8(*)	.	4
Naphtalene	9	.	9(*)	.	.	.	.	1
P-Xylene	9	.	9(*)	.	.	.	.	1
Crude oil	106	5(*)	18(*)	18(*)	28(*)	9(*)	28(*)	11
Gas condensate	35	.	24(*)	.	11(*)	.	.	6
Production formation water	33	6(*)	6(*)	.	.	8(*)	13(*)	2

Exposition	Nb cas	Réponse						S
		Fer.	Rec.	Cro.	Mor.	Bla.	Pho.	
Vegetal Derived Lubricant Oil	30	6 ^(*)	.	.	.	12 ^(*)	12 ^(*)	2
Fuel oil	15	.	9 ^(*)	.	5 ^(*)	.	1 ^(*)	4
Mineral Derived Lubricant Oil	14	6 ^(*)	.	.	.	4 ^(*)	4 ^(*)	2
Diesel	11	.	9	.	.	.	2 ^(*)	2
Gasoline	4	.	4^(*)	.	.	.	.	1
Filtres ultraviolets (Chapitre 7)								
BP3	30	.	5	.	9 ^(*)	16 ^(*)	.	3
BP1	21	.	11 ^(*)	.	.	10 ^(*)	.	2
BP8	21	.	11 ^(*)	.	.	10 ^(*)	.	2
BP4	15	.	5	.	.	10	.	2
BP2	13	.	.	.	9 ^(*)	4 ^(*)	.	1
OC	13	.	.	.	.	10	3 ^(*)	3
EHMC	10	.	.	.	.	10	.	2
Ecamsule	7	.	.	.	.	.	7	1
Drometrisole trisiloxane	5	.	.	.	.	.	5	1
Avobenzone	4	.	.	.	.	.	4 ^(*)	1
ZnO	4	.	.	.	.	.	4 ^(*)	1
Uvinul T150	3	.	.	.	.	.	3	1
EHMC & OC	6	.	.	.	.	6 ^(*)	.	2
Sunscreen brand X	16	.	.	.	.	16 ^(*)	.	2
Sunscreen brand Badger	2	.	.	.	.	2	.	1
Sunscreen brand Banana boat	2	.	.	.	.	2	.	1
Sunscreen brand Renewal	2	.	.	.	.	2	.	1
Pharmaceutiques (Chapitre 8)								
Clove oil (Eugenol)	31	.	.	12 ^(*)	2	15 ^(*)	2 ^(*)	4
Serotonin	8	.	6	.	2	.	.	2
Verapamil	7	.	.	4 ^(*)	.	.	3 ^(*)	2
Epinephrine	6	.	5	.	1 ^(*)	.	.	1
3,4-dihydroxy-L-phenylalanine (L-DOPA)	5	.	5	.	.	.	.	1
Dopamine	5	.	5	.	.	.	.	1
l-glutamic acid	5	.	5	.	.	.	.	1
Estrone	2	.	.	2 ^(*)	.	.	.	1
L-5-hydroxytryptophan	2	.	.	.	2	.	.	1
Hydrogen peroxide	1	.	.	.	1 ^(*)	.	.	1
Naloxone hydrochloride dihydrate	1	.	.	.	1	.	.	1
Tunicamycin	1	.	.	1 ^(*)	.	.	.	1
Ampicillin & Streptomycin & Naladixic Acid & Ciprofloxacin	4	.	.	.	.	2 ^(*)	2	1
Ampicillin & Streptomycin & Nalidixic acid	3	.	.	.	.	.	3 ^(*)	1
Microplastiques (Chapitre 9)								
Polyethylene	36	6 ^(*)	6	7 ^(*)	5 ^(*)	7 ^(*)	5	7
Polypropylene	18	9 ^(*)	9	.	.	.	.	1
Polystyrene	1	.	.	.	.	1	.	1
Dispersants & Détergents (Chapitre 10)								
Corexit 9527	24	10 ^(*)	12 ^(*)	1	.	.	1	2
Corexit 9500	22	.	13 ^(*)	.	9 ^(*)	.	.	3
PetrotechPTI25	14	.	4 ^(*)	.	10 ^(*)	.	.	1
Linear alkylbenzene sulfonate	14	.	.	.	12 ^(*)	.	2	3
Inipol90	13	.	4 ^(*)	.	9 ^(*)	.	.	1
EmulgalC100	12	.	4 ^(*)	.	8 ^(*)	.	.	1
Nonylphenol ethoxylate	12	.	.	.	12 ^(*)	.	.	2
SlickgoneNS	10	.	7 ^(*)	.	3	.	.	2
Ardrox 6120	8	.	7 ^(*)	.	1 ^(*)	.	.	2
Dispolen36S	8	.	.	.	8 ^(*)	.	.	1
BioreicoR93	7	.	4 ^(*)	.	3 ^(*)	.	.	1
Finasol OSR 52	7	.	7^(*)	.	.	.	.	1
Slickgone LTSW	7	.	7^(*)	.	.	.	.	1
Sodium dodecyl sulphate	7	.	7^(*)	.	.	.	.	1
Biosolve	5	.	4 ^(*)	.	1 ^(*)	.	.	1

Exposition	Nb cas	Réponse						S
		Fer.	Rec.	Cro.	Mor.	Bla.	Pho.	
Nanoparticules (Chapitre 11)								
Silver nanocolloids	9	4(*)	1(*)	.	4(*)	.	.	1
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT & ROS scavengers	4	.	.	.	4	.	.	1
4-hydroxy-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl ROS scavengers	2	.	.	.	2(*)	.	.	1
Nano TiO2	2	.	.	.	.	2	.	1
Redox polymer MeO-PEG-b-PMOT	2	.	.	.	2	.	.	1
Autres substances (Chapitre 11)								
Glycolaldehyde	8	.	.	.	.	3	5(*)	1
DMSO	6	.	.	.	6(*)	.	.	1
Ethylene glycol	6	.	.	.	6(*)	.	.	1
Glycerol	6	.	.	.	6(*)	.	.	1
Methanol	6	.	.	.	6(*)	.	.	1
Ruthenium red	4	.	.	2(*)	.	.	2(*)	1
Butylparaben	2	.	.	.	.	.	2(*)	1
Ethylparaben	2	.	.	.	.	.	2	1
Hexabromocyclododecanes	2	.	.	.	.	1	1	1
Polystyrene leachate	2	.	.	.	.	1	1	1
1,3,5-trinitro-1,3,5 triazine	1	.	.	.	.	1	.	1
CytochalasinB & colchicine	1	.	.	1(*)	.	.	.	1
Emetin	1	.	.	1(*)	.	.	.	1
PCBs	1	.	.	.	.	.	1	1
Hydrocarbures & Dispersants (Chapitre 6)								
Crude oil & Corexit9527	34	10(*)	12(*)	11(*)	.	.	1(*)	4
Crude oil & Corexit9500	31	.	6(*)	8(*)	9(*)	.	8(*)	3
Crude oil & PetrotechPTI25	17	.	.	.	17(*)	.	.	2
Crude oil & EmulgalC100	16	.	.	.	16(*)	.	.	2
Crude oil & SlickgoneNS	16	.	.	.	16(*)	.	.	2
Crude oil & Dispolen36S	11	.	.	.	11(*)	.	.	2
Crude oil & Inipol90	11	.	.	.	11(*)	.	.	2
Crude oil & BioreicoR93	10	.	.	.	10(*)	.	.	2
Crude oil & BP1100WD	6	.	.	6	.	.	.	1
Fuel oil & Ardrex6120	2	.	.	.	2(*)	.	.	1
Crude oil & Biosolve	1	.	.	.	1(*)	.	.	1
Métaux & Hydrocarbures (Chapitre 4, Chapitre 6)								
Coal leachate	12	6(*)	6(*)	.	.	.	.	1
Métaux et Nutriments (Chapitre 4)								
Ni & Urea	7	.	.	3	.	2(*)	2	3
Fe & Nitrate	3	.	.	1(*)	.	1	1(*)	1
Métaux & Pesticides (Chapitre 4, Chapitre 5)								
Sediment contaminated with antifoulant paint (TBT, dibutyltin, monobutyltin, zinc, copper)	16	.	6(*)	.	4(*)	3	3(*)	2
Cu-based antifoulant paints (cuprous oxide & diuron)	4	2(*)	2(*)	.	.	.	.	1
TBT-based antifoulant paints (tributyltin oxide & cuprous oxide)	4	2(*)	2(*)	.	.	.	.	1

Annexes

Annexe A : Lettre de saisine

Arrivé
Bureau Vincennes AFB

Le 05 NOV. 2018



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Paris, le 31 OCT. 2018

La secrétaire d'État auprès du ministre d'État,
ministre de la Transition écologique et solidaire

à

Monsieur le directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire,
de l'alimentation, de l'environnement
et du travail

Monsieur le directeur général
de l'Agence française pour la biodiversité

Objet : Saisine relative aux impacts des substances chimiques sur les récifs coralliens.

Le gouvernement a annoncé le 1^{er} août dernier le lancement d'une mission destinée à identifier les substances chimiques les plus toxiques pour les récifs coralliens afin de mieux protéger ces écosystèmes fragiles, qui recouvrent moins de 1 % des fonds océaniques mais constituent l'habitat de 25 % des espèces de poissons marins. Les coraux protègent également les côtes et fournissent de la nourriture à environ 500 millions de personnes dans le monde.

La France porte une responsabilité particulière à l'égard des océans et de leurs coraux. Les récifs coralliens des outre-mer français et leurs lagons couvrent près de 58 000 km² soit près de 10 %, en surface, des récifs mondiaux et occupent la quatrième place mondiale après l'Australie, l'Indonésie et les Philippines. Les récifs coralliens sont présents dans 11 des 13 territoires d'outre-mer français. La biodiversité qu'ils renferment est exceptionnelle. On estime ainsi qu'un km² de récif corallien contient autant de biodiversité que l'ensemble des eaux métropolitaines. En outre, du fait de la présence des territoires français dans les trois océans, cette biodiversité est représentative de la biodiversité marine tropicale de l'océan mondial.

Ces écosystèmes sont cependant gravement menacés. Au niveau mondial, on estime que 20 % des récifs ont été irrémédiablement détruits au cours des dernières décennies. Et parmi les 80 % restants, seul le tiers serait dans un état satisfaisant. Les études décrivant les atteintes graves à ces écosystèmes s'accroissent.

.../...

Parmi ces menaces, le dérèglement climatique, et par conséquent l'augmentation de la température des océans, comme leur acidification, sont clairement identifiés. Toutefois, la résistance et la résilience des coraux à ces pressions globales sont fortement conditionnées par d'autres sources de pressions, plus locales, causées par les activités anthropiques et engendrant tous types de pollutions. Ainsi, certaines substances chimiques conduisent à leur dégradation.

Les effets de certaines substances chimiques sur les coraux ont déjà été étudiés, notamment :

- l'étude de certains dérivés du pétrole et hydrocarbures suite aux marées noires ;
- les travaux conduits par l'IFRECOR sur les pesticides et les herbicides dans les écosystèmes coralliens des collectivités d'outre-mer françaises (Ramade, 2012) ;
- l'étude conduite par l'International Society for Reef Studies (ISRS) sur l'impact de certains composés des crèmes solaires (filtres UV chimiques) sur les récifs coralliens (ICRI, 2018).

Conformément aux articles L131-8 et L131-9 du code de l'environnement, instituant l'agence française pour la biodiversité (AFB), et conformément aux missions de l'Agence nationale de sécurité de l'alimentation et de l'environnement (Anses), notamment en tant qu'autorité compétente d'évaluation au titre de règlements européens sur les substances chimiques (notamment REACH et les règlements sur les pesticides), l'AFB et l'Anses sont saisies afin d'organiser et restituer l'expertise collective à produire avec ses partenaires sur les points suivants :

1. Procéder à un travail de revue bibliographique permettant d'identifier les substances susceptibles d'avoir un impact sur les récifs coralliens, les principales sources de production et de rejet de ces substances et l'importance de leurs apports dans le milieu (volume, fréquence, disponibilité).
 - Cette revue concernera en particulier les substances présentes sur le marché. Les substances d'ores et déjà interdites mais toujours présentes dans l'environnement pourront également être examinées.
 - Parmi les substances chimiques sont jugées prioritaires dans le cadre de cette étude : les pesticides, les filtres UV-chimiques, les métaux lourds, les matières fertilisantes, ainsi que les substances pouvant être présentes dans les lessives, les cosmétiques, les produits ménagers, ou les microplastiques, et tout autre usage que vous identifierez important.
 - Dans la revue, les substances pourront être distinguées selon :
 - leurs effets toxiques sur les coraux pouvant conduire à une surmortalité et/ou une réduction de fonctions biologiques critiques pour les populations de coraux (reproduction, développement, etc.) ;
 - d'autres effets éventuels directs ou indirects pouvant expliquer la réduction de la résilience des récifs coralliens vis-à-vis d'autres pressions (réchauffement des eaux par exemple) ;

.../...

- l'influence de ces effets sur le fonctionnement de l'écosystème des récifs coralliens,
- Une partie de la revue pourra être consacrée aux effets combinés si des informations sont disponibles sur ce sujet.

Ce travail sera coordonné par l'AFB.

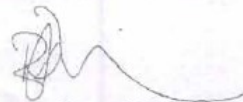
2. Proposer les mesures techniques et réglementaires selon les substances identifiées. En particulier seront identifiées les mesures dans le cadre de règlement REACH permettant de prendre en compte ces enjeux environnementaux. Ces mesures seront priorisées au regard des impacts sur les récifs coralliens. Pour exemple, Hawaï a de ce fait récemment pris la décision d'interdire à partir de 2021 les crèmes solaires contenant deux substances chimiques, l'oxybenzone et l'octinoxate, responsables du blanchiment de coraux. Des études scientifiques ont également montré que ces deux substances chimiques induisaient la féminisation de poissons mâles et augmentaient les problèmes de reproduction chez les invertébrés marins (comme les oursins), chez les vertébrés (des poissons comme les labres, les loups de mer ou les poissons-perroquets) et les mammifères (phoque moine d'Hawaï).

Ce travail sera coordonné par l'ANSES.

Vous avez toute latitude pour vous appuyer :

- Sur l'expertise scientifique de l'Ifremer en matière de recherche écologique, biologique et écotoxicologique marines et ainsi que celle de ces partenaires : l'Ineris dans le cadre de la cellule conjointe Analyse des Risques Chimiques en milieu marin, et l'IRD.
- Sur l'expertise d'autres partenaires tels que l'IFRECOR, le CNRS ou le Cerema dans une démarche de valorisation de recherches multidisciplinaires sur les atteintes des récifs coralliens et de développements pour leur protection

Le travail d'identification des substances et de leurs effets sur les écosystèmes porté par l'AFB est attendu pour juin 2019. Celui relatif aux mesures techniques et réglementaires porté par l'Anses est attendu pour septembre 2019. Je vous remercie de bien vouloir m'adresser un contrat de cadrage de vos travaux pour le 30 novembre prochain.



Brune POIRSON

Annexe B : Liste des études exclues de la synthèse avec la raison

Fichier excel *RevueSystematique_EffetsEcotoxicologiquesCoraux_ANNEXE_B.xlsx*

Annexe C : Base de données de la revue systématique

Liste des références alimentant les synthèses quantitative et/ou narrative (feuille "References_articles_inclus") ; Résultats pour la synthèse quantitative (feuille "donnees_synthese_quantitative"); Résultats pour la synthèse narrative (feuille "donnees_synthese_narrative").

Fichier excel *RevueSystematique_EffetsEcotoxicologiquesCoraux_ANNEXE_C.xlsx*

Annexe D : Chapitre de synthèse des études observationnelles

Ce chapitre présente les résultats d'un travail de synthèse mené à la demande de l'Anses en parallèle de la revue systématique sur un groupe d'études identifiées par la carte systématique. Le périmètre de cette synthèse porte sur les études observationnelles (c'est-à-dire où l'exposition n'est pas contrôlée par les chercheurs) et l'objectif est d'avoir des informations sur les effets d'une exposition aux substances chimiques « en conditions de vie réelles » pour les coraux. Le périmètre de la synthèse est défini comme suit :

- **Population** : tous les coraux tropicaux constructeurs de récifs. On s'intéresse à tous les stades de développement (planula libre, polype fixe) et à tous les compartiments y compris l'algue symbiotique "dans l'hôte" et le microbiome.
- **Exposition** : Toutes les expositions provenant des activités humaines pour lesquelles au moins une substance ou catégorie de substances est identifiée, à l'exception d'une exposition aux nutriments/eutrophisation.
- **Comparateur** : Comparaison non exposé vs exposé, peu exposé vs très exposé, ou avant vs après exposition.
- **Réponse mesurée (outcome)** : outcomes directement reliés à l'état de santé des coraux (exclusion de la bioaccumulation).
- **Type d'études** : études observationnelles

D.1 Recherche et tri des études

Les études ont été extraites de la base de données de la carte systématique (Ouédraogo et al., 2021a). Dans la base de données, 445 études observationnelles (54 documents) correspondent au périmètre défini ci-dessus, mais 3 études ont été retirées car l'exposition étudiée s'est révélée être d'origine naturelle (suintements naturels d'hydrocarbures). La synthèse se base donc au départ sur 442 études correspondant à 52 documents.

D.2 Robustesse des études

Les 442 études ont été examinées à travers une grille de critères pour évaluer dans quelle mesure ces études sont exemptes de biais (**Tableau D.1**). Un niveau de risque de biais global a ensuite été attribué à chaque étude :

- Faible : tous les critères ont un niveau de biais faible ;
- Moyen : au moins un critère a un niveau de risque de biais moyen, mais aucun critère n'a un niveau de risque de biais fort ;
- Fort : au moins un critère a un niveau de risque de biais fort.

Tableau D.1. Grille de critères pour l'analyse critique (Abréviations : C = contrôle ; E = exposé ; B = before ; A = after ; N/A = non applicable).

Biais	Critère	Risque de biais faible	Risque de biais moyen	Risque de biais fort
Facteurs confondants	Y'a-t-il des facteurs confondants ? ex. différences importantes au départ entre C et E ; différence de protocole entre C et E ; différence d'analyse de données entre C et E ; etc.	- Non - Inconnu		- Oui
/!\ Si des facteurs confondants sont présents l'évaluation se limite à ce critère				
Biais lié au <i>design</i> expérimental général	Quel est le type de <i>design</i> expérimental ? (Gradient : gradient du moins exposé au plus exposé ; C+gradient : site contrôle + gradient d'exposition)	- CE - BA - BACE - Gradient - C+gradient		- Inconnu
	Réplication de l'échantillonnage (un réplicat = un site indépendant ; si plusieurs transects dans un même site c'est une pseudo-réplication)	- Replication - Pseudo-replication	- Non - Inconnu	
	Les sites ou transects sont-ils choisis aléatoirement ou systématiquement ?	- Random - Systematic - N/A (BA design)	- Non - Inconnu	
Autres biais	Existe-t-il une autre source de biais ? ex. biais d'attrition : différence dans la manière dont les groupes C et E sont retirés de l'étude	- Non	- Oui mineur	- Oui majeur

D.3 Extraction des résultats

Les résultats des études ayant un **risque de biais faible ou moyen** ont été extraits dans une table narrative qui indique le résultat textuel et si l'exposition entraîne une augmentation ou une diminution statistiquement significative de la réponse mesurée, ou aucun effet statistiquement significatif. Il faut noter que lorsque les résultats sont uniquement descriptifs, **sans test de la significativité statistique** des différences observées entre les groupes traité et contrôle, **les résultats ne sont pas extraits**. Au cours de l'extraction, certaines études ont parfois dû être divisées en plusieurs « cas d'étude » lorsque :

- la réponse mesurée (outcome) avait été codée globalement (ex. expression des gènes) mais consistait en fait en un ensemble de plusieurs réponses (ex. expression du gène 1, expression du gène 2, etc.) ;
- il y avait plusieurs sites ;
- il y avait plusieurs années d'observations ;
- il y avait plusieurs stades de développement mesurés (juvénile et adulte).

D.4 Description des cas d'étude

Les 442 études / 52 documents correspondent à 598 cas dont 48.5% avaient un risque de biais global faible et 32.8% un risque de biais global moyen, selon les critères définis dans le **Tableau D.1 (Figure D.1)**. Les cas ayant un risque de biais global fort, soit 112 cas (18.7%), ne présentaient pas, pour la très grande majorité d'entre eux, de véritable site contrôle. Soit le site contrôle était soumis lui aussi à une exposition (identique ou non au site exposé), soit il présentait des différences environnementales fortes avec le site exposé (différence de profondeur, d'étage). Tous les cas ayant un risque de biais global fort ont été exclus de la synthèse (Annexe E).

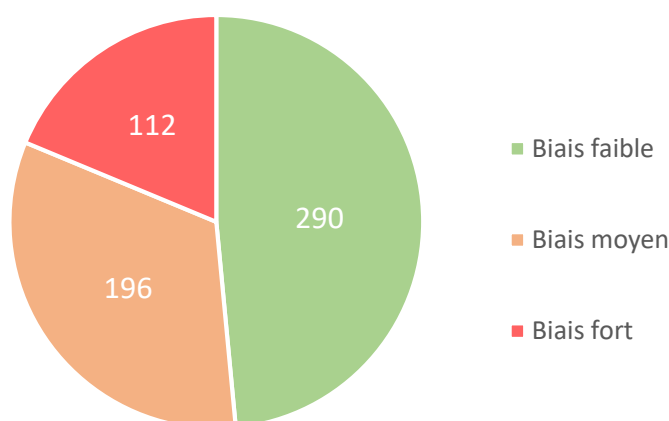


Figure D.1. Nombre de cas en fonction du niveau de risque de biais global attribué.

Sur les 486 cas présentant un risque de biais faible ou moyen, 267 présentaient des résultats qui n'étaient pas accompagnés de test de la significativité statistique des différences observées entre les groupes traité et contrôle et ont donc de ce fait été exclus de la synthèse (Annexe E). Un cas d'erreur de metacoding a également été exclu de la synthèse.

D.5 Description des cas d'étude alimentant la synthèse

Finalement, **218 cas** pour lesquels les résultats ont été extraits (correspondant à **98 études / 24 documents**) ont été retenus dans la synthèse (Annexe E). Ces 218 cas concernent principalement les Iles Vierges Américaines (59 cas), les Etats Fédérés de Micronésie (44), le Panama (37) et l'Australie (24). Pour les Territoires d'Outre-Mer français, seule la Nouvelle-Calédonie est représentée avec 8 cas.

Les différentes expositions étudiées ont été regroupées en dix catégories (**Tableau D.2**). Ces catégories correspondent à des catégories d'exposition spécifique (l'exploitation industrielle d'une ressource par exemple) sauf une qui correspond à diverses activités, urbaines, industrielles ou touristiques, difficilement classable et parfois concomitantes. Pour chaque catégorie d'exposition, certaines substances chimiques ont été mesurées dans l'environnement (**Tableau D.2**) mais il faut noter qu'une exposition à d'autres substances non mesurées est possible. Les catégories « Marées noires » et « Activités urbaines/industrielles/touristiques variées » regroupent le plus de cas (**Figure D.2**).

Tableau D.2 : Catégories d'exposition définies pour l'ensemble des 598 cas recensés et détail des expositions (Catégorie de substances chimiques et description de l'exposition) pour les 218 cas inclus dans la synthèse narrative.

Catégorie d'exposition	Catégorie de substances chimiques	Description
Marées noires (107)	Hydrocarbure (91)	Echouage de pétroliers, guerre du Golfe
Exploitations d'hydrocarbures (170)	Hydrocarbure (35 cas) ; Hydrocarbure & Autre (1)	Raffineries pétrolières, plateformes pétrolières
Epaves (14)	Métal (6)	Morceaux/Débris de navire échoué, résidus de munitions
Exploitations minières (30)	Métal (2)	Extraction de nickel, fonderie d'étain
Autres industries (8)	Métal (1)	Raffinerie de rhum
Agriculture et/ou aquaculture (4)	Pesticide (1)	Intrants agricoles
Activités urbaines/industrielles/touristiques variées (255)	Hydrocarbure (5) Métal (9) Métal & Hydrocarbure (2) Métal & Nutriment (6) Nutriment & Hydrocarbure & Pesticide (59)	Apports urbain et/ou industriels (zone portuaire, aéroport), impacts liés au tourisme (aéroport, bateaux touristiques)
Echouage de la cargaison (argile de Kaolin et agent mouillant) de cargo (4)	<i>Pas de cas retenus dans la synthèse narrative</i>	
Pêche au cyanure (3)	<i>Pas de cas retenus dans la synthèse narrative</i>	
Tests nucléaires (3)	<i>Pas de cas retenus dans la synthèse narrative</i>	

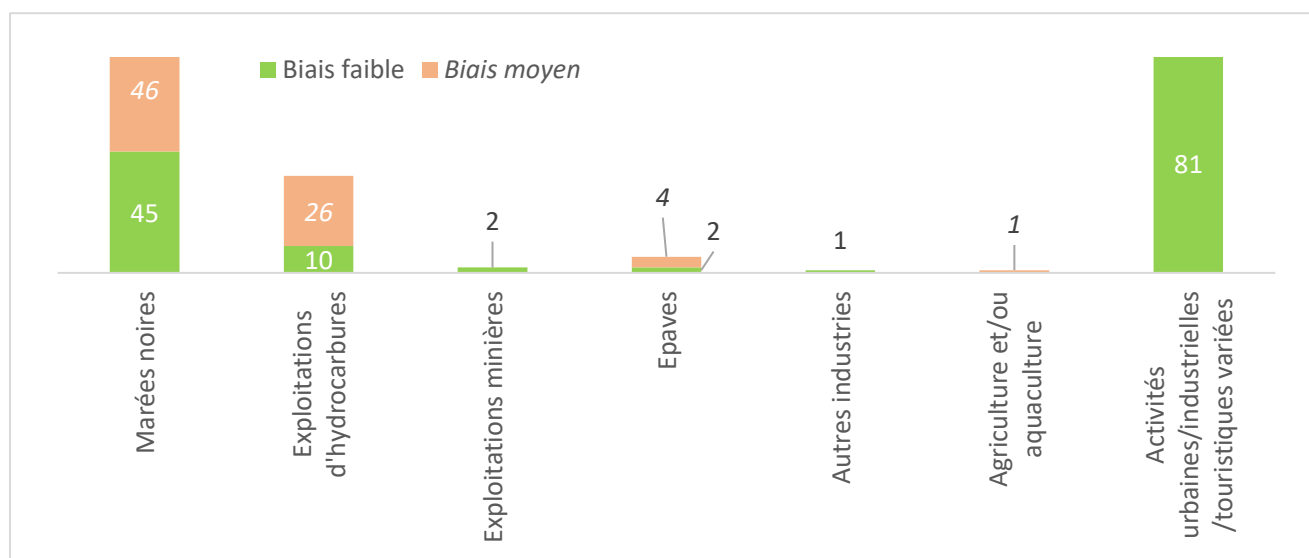


Figure D.2. Nombre de cas en fonction de la catégorie d'exposition et du niveau de biais.

Les réponses mesurées (*outcome*) ont également été regroupées en 12 catégories. La réponse la plus mesurée est la « réponse moléculaire » déclenchée par un stress (104 cas) suivie de la catégorie « couverture corallienne et abondance » (42 cas, **Figure D.3**).



Figure D.3. Nombre de cas en fonction de la catégorie d'*outcome* et du niveau de biais.

D.6 Synthèse des résultats

Cette synthèse des observations de terrain rapportant une réponse des coraux constructeurs de récifs tropicaux à différentes pollutions chimiques issues des activités humaines a permis de mettre en évidence **qu'une majorité des réponses mesurées traduisent un effet négatif sur le corail (117 observations sur 218 au total, soit 53,7 %) ou bien une absence d'effet (85 observations sur 218 soit 39 %, Annexe E, Tableau D.3)**. Des effets négatifs sont observés pour toutes les catégories d'exposition, exceptées les « exploitations minières » (mais seulement 2 observations sont disponibles) et l'exposition aux effluents d'une raffinerie de rhum (catégorie « Autre industrie », mais une seule observation est disponible). Des effets négatifs sont également observés pour toutes les catégories de réponses mesurées (outcomes), excepté le pourcentage de régénération après des lésions (une seule observation est disponible).

Les observations présentant une réponse à première vue positive du corail après exposition (16 observations), doivent être interprétées avec précaution. Par exemple, pour le pourcentage de régénération après des lésions ou la capacité reproductive, les auteurs de l'étude précisent que bien que l'élément mesuré soit plus performant chez le corail exposé que le corail non exposé, l'intégrité du corail n'en est pas moins affectée. En effet, en réponse à un stress, certains coraux peuvent allouer toute leur énergie disponible dans une seule fonction au détriment de toutes les autres, et il est recommandé de mesurer plusieurs paramètres pour pouvoir correctement déterminer l'état de santé des coraux. Ces réponses à première vue « positives » pourraient aussi être liées à une absence d'exposition réelle des coraux à la pollution à cause de conditions environnementales particulières (hydrodynamisme par exemple) au niveau des sites étudiés qui pourraient favoriser la dispersion des substances chimiques et ainsi limiter voire annuler leurs impacts sur les coraux.

Il faut rappeler que ces études observationnelles, contrairement aux études expérimentales présentées dans les chapitres précédents, **ne permettent pas d'établir directement un lien de causalité** entre l'exposition aux substances chimiques et les effets observés sur les coraux constructeurs de récifs. Néanmoins, ces effets négatifs observés « **en conditions de vie réelles** » pour presque toutes les catégories d'exposition sur les coraux indiquent que ces diverses activités peuvent constituer une menace pour les coraux constructeurs de récifs, et avoir des conséquences pour l'ensemble de la biodiversité des récifs coralliens et les services qu'ils rendent aux sociétés humaines.

Tableau D.3. Nombre de cas et effet de l'exposition sur chaque catégorie de réponse mesurée. Le + indique que l'effet entraîne une augmentation statistiquement significative de la réponse mesurée, le - une diminution statistiquement significative, ns indique qu'aucune différence statistiquement significative n'a été trouvée. La couleur rouge indique que l'effet est négatif sur le corail, le vert que l'effet est positif, le noir que l'effet est neutre. Le nombre de cas pour chaque catégorie d'exposition et de réponse mesurée est également indiqué. Les cas pour lesquels le niveau de risque de biais est faible et moyen sont indiqués en texte simple et en italique, respectivement. * Cas pour lesquels le sens du résultat a été inversé par rapport au résultat brut dans la publication, pour la cohérence de l'ensemble du tableau. (+/-) indique un changement de composition de la communauté sans que l'on puisse déterminer si cela est positif ou négatif pour les coraux.

EXPOSITION	REPONSE MESUREE												Total
	Couverture corallienne/abondance	Taille des colonies	Composition de la communauté	Indices de diversité	Croissance	% Régénération des lésions	Capacité reproductive	Recrutement	Blanchissement	Maladie ou lésions	Mortalité	Réponse moléculaire au stress	
Marées noires	3 (-) 2 (+) 19 (ns) 2 (-)	1 (-) 1 (-)*		1 (-) 1 (ns)	1 (-) 6 (ns)	1 (+)	1 (-) 2 (ns)			5 (+) 1 (ns)		29 (+) 12 (ns) 3 (-)	91
Exploitations d'hydrocarbures	1 (-)	1 (-)*			1 (-) 1 (ns)		13 (-) 4 (ns) 4 (+)	2 (-) 3 (ns) 1 (+)	1 (-)		2 (+) 1 (ns)	1 (+)*	36
Exploitations minières	1 (+)		1 (+/-)										2
Epaves	2 (+) 1 (+) 1 (-)			2 (-)									6
Autres industries					1 (ns)								1
Agriculture et/ou aquaculture											1 (+)		1
Activités urbaines/industrielles/touristiques variées	5 (-) 5 (ns)	1 (-)	4 (ns)	1 (-)				2 (-) 2 (ns)	2 (ns)			37 (+) 21 (ns) 1 (-)	81
Total	42	4	5	5	10	1	24	10	3	6	4	104	218

Annexe E : Données de la synthèse des études observationnelles

Liste des cas d'étude exclus de la synthèse avec la raison (feuillelet "exclus") ; Résultats pour la synthèse narrative (feuillelet "donnees_synthese_obs") ; Liste des références alimentant la synthèse (feuillelet "References_articles_inclus").

Fichier excel *RevueSystematique_EffetsEcotoxicologiquesCoraux_ANNEXE_E.xlsx*

Références

- Barlow, J., França, F., Gardner, T.A., Hicks, C.C., Lennox, G.D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E.P., Ferreira, J., Guénard, B., Leal, C.G., Isaac, V., Lees, A.C., Parr, C.L., Wilson, S.K., Young, P.J., Graham, N.A.J., 2018. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature* 559, 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>
- Brown, B.E., 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16, S129–S138. <https://doi.org/10.1007/s003380050249>
- Burke, L., Reyntar, K., Spalding, M., Perry, A., 2011. Reefs at risk revisited. World Resources Institute, Washington DC.
- Cesar, H., Burke, L., Pet-Soede, L., 2003. The economics of worldwide coral reef degradation. International Coral Reef Action Network.
- Cunning, R., Silverstein, R.N., Barnes, B.B., Baker, A.C., 2019. Extensive coral mortality and critical habitat loss following dredging and their association with remotely-sensed sediment plumes. *Mar. Pollut. Bull.* 145, 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.027>
- D’Angelo, C., Wiedenmann, J., 2014. Impacts of nutrient enrichment on coral reefs New perspectives and implications for coastal management and reef survival. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 7. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.029>
- De Barros Marangoni, L.F., Marques, J.A., Duarte, G.A.S., Pereira, C.M., Calderon, E.N., Castro, C.B. e, Bianchini, A., 2017. Copper effects on biomarkers associated with photosynthesis, oxidative status and calcification in the Brazilian coral *Mussismilia harttii* (Scleractinia, Mussidae). *Mar. Environ. Res.* 130, 248–257. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.08.002>
- DeCarlo, T.M., Cohen, A.L., Barkley, H.C., Cobban, Q., Young, C., Shamberger, K.E., Brainard, R.E., Golbuu, Y., 2015. Coral macrobioerosion is accelerated by ocean acidification and nutrients. *Geology* 43, 7–10. <https://doi.org/10.1130/G36147.1>
- Donovan, M.K., Adam, T.C., Shantz, A.A., Speare, K.E., Munsterman, K.S., Rice, M.M., Schmitt, R.J., Holbrook, S.J., Burkepile, D.E., 2020. Nitrogen pollution interacts with heat stress to increase coral bleaching across the seascape. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117, 5351–5357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915395117>
- Duprey, N.N., Yasuhara, M., Baker, D.M., 2016. Reefs of tomorrow: eutrophication reduces coral biodiversity in an urbanized seascape. *Glob. Change Biol.* 22, 3550–3565. <https://doi.org/10.1111/gcb.13432>
- Ellis, J.I., Jamil, T., Anlauf, H., Coker, D.J., Curdia, J., Hewitt, J., Jones, B.H., Krokos, G., Kürten, B., Hariprasad, D., Roth, F., Carvalho, S., Hoteit, I., 2019. Multiple stressor effects on coral reef ecosystems. *Glob. Change Biol.* 25, 4131–4146. <https://doi.org/10.1111/gcb.14819>
- Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat. Commun.* 5, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Fisher, R., O’Leary, R.A., Low-Choy, S., Mengersen, K., Knowlton, N., Brainard, R.E., Caley, M.J., 2015. Species Richness on Coral Reefs and the Pursuit of Convergent Global Estimates. *Curr. Biol.* 25, 500–505. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.12.022>
- Hedges, L.V., 1982. Estimation of effect size from a series of independent experiments. *Psychol. Bull.* 92, 490–499. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.92.2.490>
- Hedges, L.V., Olkin, I., 1985. *Statistical Methods for Meta-Analysis*. Academic Press, Orlando.
- Hoegh-Guldberg, O., Pendleton, L., Kaup, A., 2019. People and the changing nature of coral reefs. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 30, 100699. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100699>
- Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E.S., Skirving, W., Dove, S., 2017. Coral Reef Ecosystems under Climate Change and Ocean Acidification. *Front. Mar. Sci.* 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>

- Hoeksema, B.W., 2017. The hidden biodiversity of tropical coral reefs. *Biodiversity* 18, 8–12. <https://doi.org/10.1080/14888386.2017.1307787>
- Ifrecor, 2020. Etat de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français. Bilan 2020.
- Joannot, P., 2010. Les récifs coralliens, un écosystème à protéger, in: *La Science Au Présent 2010*. Encyclopedia Universalis, pp. 204–214.
- Lajeunesse, T.C., Parkinson, J.E., Gabrielson, P.W., Jeong, H.J., Reimer, J.D., Voolstra, C.R., Santos, S.R., 2018. Systematic Revision of Symbiodiniaceae Highlights the Antiquity and Diversity of Coral Endosymbionts. *Curr. Biol.* 28, 2570–2580.e6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.07.008>
- MacNeil, M.A., Mellin, C., Matthews, S., Wolff, N.H., McClanahan, T.R., Devlin, M., Drovandi, C., Mengersen, K., Graham, N.A.J., 2019. Water quality mediates resilience on the Great Barrier Reef. *Nat. Ecol. Evol.* 3, 620–627. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0832-3>
- Ouédraogo, D.-Y., Delaunay, M., Sordello, R., Hédouin, L., Castelin, M., Perceval, O., Domart-Coulon, I., Burga, K., Ferrier-Pagès, C., Multon, R., Guillaume, M.M.M., Léger, C., Calvayrac, C., Joannot, P., Reyjol, Y., 2021a. Evidence on the impacts of chemicals arising from human activity on tropical reef-building corals; a systematic map. *Environ. Evid.* 10. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00237-9>
- Ouédraogo, D.-Y., Perceval, O., Ferrier-Pagès, C., Domart-Coulon, I., Hédouin, L., Burga, K., Guillaume, M.M.M., Calvayrac, C., Castelin, M., Reyjol, Y., Sordello, R., 2021b. Estimating ecotoxicological effects of chemicals on tropical reef-building corals; a systematic review protocol. *Environ. Evid.* 10, 35. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00250-y>
- Ouédraogo, D.-Y., Sordello, R., Brugneaux, S., Burga, K., Calvayrac, C., Castelin, M., Domart-Coulon, I., Ferrier-Pagès, C., Guillaume, M.M.M., Hédouin, L., Joannot, P., Perceval, O., Reyjol, Y., 2020. What evidence exists on the impacts of chemicals arising from human activity on tropical reef-building corals? A systematic map protocol. *Environ. Evid.* 9, 18. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00203-x>
- Pastore, M., 2014. The Impact of Nitrogen Eutrophication on Caribbean Coral Reefs: A Review*. *Concept* 37.
- Pick, J.L., Nakagawa, S., Noble, D.W.A., 2019. Reproducible, flexible and high-throughput data extraction from primary literature: The metaDigitiser package. *Methods Ecol. Evol.* 10, 426–431. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13118>
- Prouty, N.G., Cohen, A., Yates, K.K., Storlazzi, C.D., Swarzenski, P.W., White, D., 2017. Vulnerability of Coral Reefs to Bioerosion From Land-Based Sources of Pollution. *J. Geophys. Res. Oceans* 122, 9319–9331. <https://doi.org/10.1002/2017JC013264>
- Richmond, R.H., Tisthammer, K.H., Spies, N.P., 2018. The Effects of Anthropogenic Stressors on Reproduction and Recruitment of Corals and Reef Organisms. *Front. Mar. Sci.* 5. <https://doi.org/10/ggc6gt>
- Risk, M.J., 2014. Assessing the effects of sediments and nutrients on coral reefs. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 7. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.01.003>
- Schuhmacher, H., Zibrowius, H., 1985. What is hermatypic? *Coral Reefs* 4, 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF00302198>
- Shantz, A.A., Burkepille, D.E., 2014. Context-dependent effects of nutrient loading on the coral-algal mutualism. *Ecology* 95. <https://doi.org/10/f6bqg3>
- Shantz, A.A., Lemoine, N.P., Burkepille, D.E., 2016. Nutrient loading alters the performance of key nutrient exchange mutualisms. *Ecol. Lett.* 19. <https://doi.org/10.1111/ele.12538>
- Sheppard, C., Davy, S., Pilling, G., Graham, N., 2018. Coral reefs: biodiverse and productive tropical ecosystems, in: *The Biology of Coral Reefs Second Edition*. Oxford University Press, Oxford.
- Sordello, R., Bertheau, Y., Coulon, A., Jeusset, A., Ouédraogo, D.-Y., Vanpeene, S., Vargac, M., Villemey, A., Witté, I., Reyjol, Y., Touroult, J., 2019. Les protocoles expérimentaux en écologie. Principaux points clefs.

- Souter, D., Planes, S., Wicquart, J  r  my, Logan, Murray, Obura, David, Staub, Francis, 2021. Status of Coral reefs of the World: 2020.
- Wilkinson, C., 2008. Status of coral reefs of the world: 2008, Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre. ed. Townsville, Australia.
- Wooldridge, S.A., 2009. Water quality and coral bleaching thresholds: formalising the linkage for the inshore reefs of the Great Barrier Reef, Australia. *Mar Pollut Bull* 58, 745–51. <https://doi.org/10/b8xgc6>
- Zaneveld, J.R., Burkepile, D.E., Shantz, A.A., Pritchard, C.E., McMinds, R., Payet, J.P., Welsh, R., Correa, A.M., Lemoine, N.P., Rosales, S., Fuchs, C., Maynard, J.A., Thurber, R.V., 2016. Overfishing and nutrient pollution interact with temperature to disrupt coral reefs down to microbial scales. *Nat Commun* 7, 11833. <https://doi.org/10/ggc6g2>