

## LES THEMES DE SCIENCE-CLIMAT-ENERGIE

SCE a vu le jour en juin 2018 sous l'impulsion de plusieurs professeurs d'universités européennes. Plus de 250 articles ont été publiés après examen par un Comité Editorial. Les articles sont repris dans une liste des auteurs ([ici](#)) et permettent un dialogue entre lecteurs et auteurs ou lecteurs entre eux, à travers une rubrique 'commentaires' dont les règles ont été fixées ([ici](#)).

Au terme de ces 5 ans, nous avons décidé de regrouper les articles sous forme de .pdf reprenant chaque fois un thème précis. Cela permet de disposer pour tout lecteur d'un document complet sur un sujet précis, plutôt que de devoir aller chercher les articles un à un sur une période de près de 5 ans. Une sélection des articles les plus représentatifs a été opérée afin de couvrir au mieux chaque thème.

Nous publierons au fur et à mesure ces documents reprenant les articles spécifiques.

Le présent document intitulé **Acidification de l'océan** reprend deux articles sélectionnés parus en juin 2018 et mars 2022.

Nous espérons que ces documents seront utiles et diffusés à grande échelle.



## ACIDIFICATION DE L'OCEAN

1. Réflexions sur l'acidification des océans, P. Berth, p.2-8.
2. La plupart des études exagèrent les effets de l'acidification de l'océan, P. Berth et A. Prétat, p.8-18

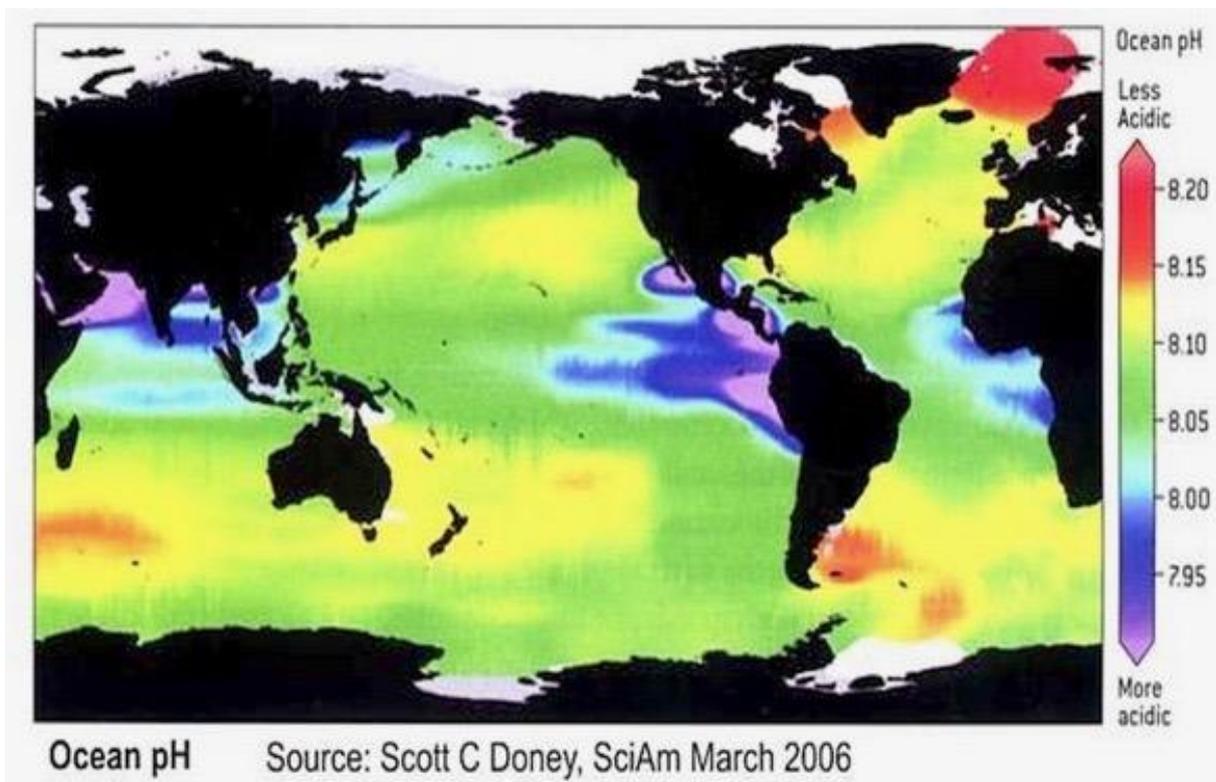
## 1. Réflexions sur l'acidification des océans

Mis en ligne SCE : 05.06.2018

Voici quelques réflexions sur la théorie de l'acidification des océans. Selon cette théorie, le pH des océans diminuerait inlassablement, en raison du CO<sub>2</sub> qui ne cesse de s'accumuler dans l'atmosphère.

- **Les mesures directes de pH sont récentes et nous n'avons aucun recul.** Selon les médias et les ONG écologistes, qui se basent sur le GIEC et sur certaines publications (e.g., Caldeira & Wickett 2003), le pH des océans aurait été de 8.25 en 1750. Cependant, il faut savoir que personne n'a jamais mesuré le pH des océans en 1750, puisque le concept de pH n'a été inventé qu'en 1909 (par le danois Søren P.L. Sørensen), et que les premiers appareils fiables pour mesurer le pH ne sont apparus qu'en 1924... Nous ne sommes donc pas certains de cette valeur de 8.25 pour 1750... La valeur de 8.25 est donc obtenue par des mesures indirectes et n'est donc pas certaine.

- **A l'heure d'aujourd'hui, tous les pH sont possibles.** Lorsqu'on dit que les océans actuels sont à un pH de 8.1, de quel océan parle-t-on? S'agit-il du pH moyen global? Si c'est de cela qu'on parle, quelle est l'incertitude sur la mesure? (i.e., l'écart-type?). Ceci n'est jamais indiqué. Il faut savoir que si l'on prend un jour de la semaine, tous les pH sont possibles dans les océans, comme l'illustre très bien la figure suivante.

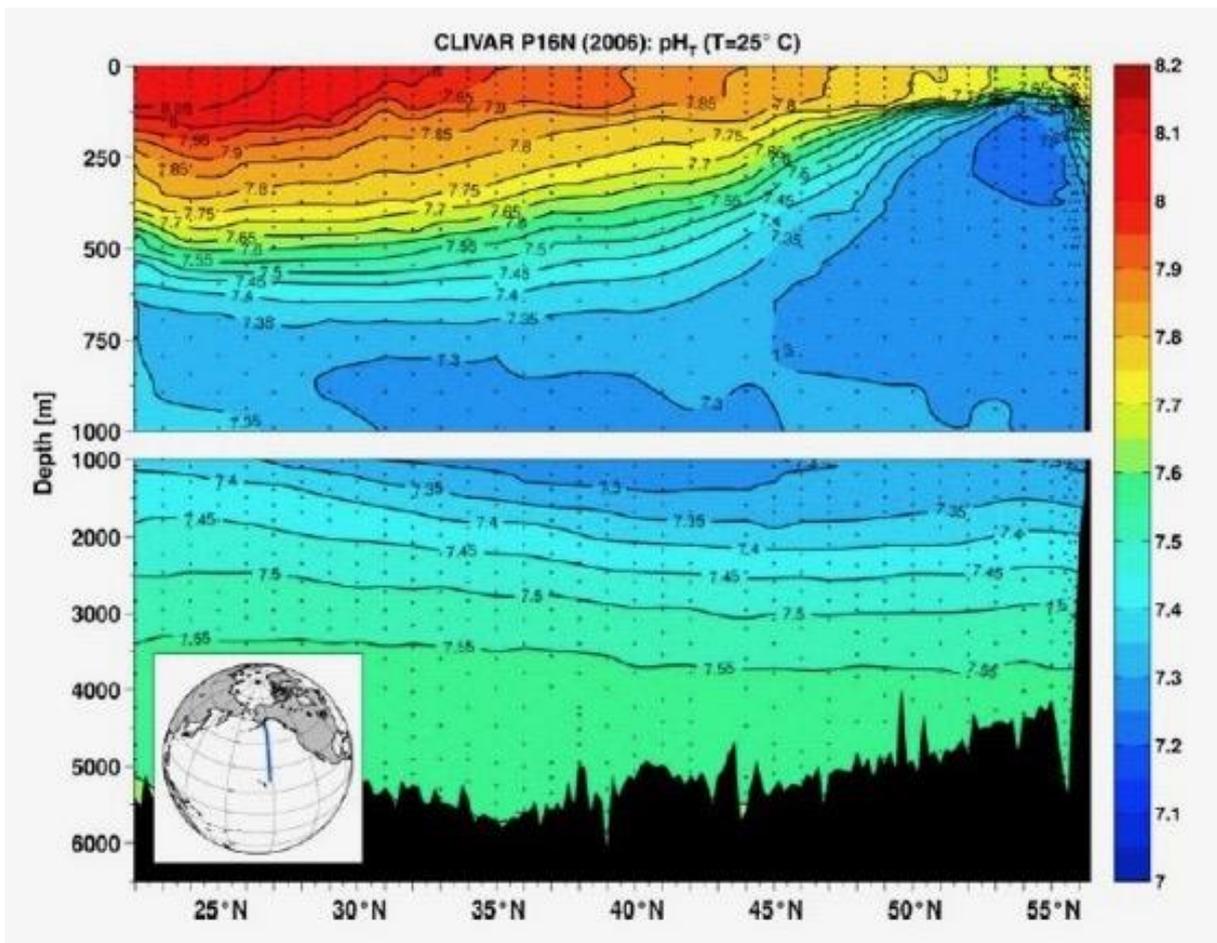


Nous voyons par exemple que nous avons des zones à pH 7.8, d'autres à 8.1 et encore d'autres à 8.2 voire plus. De nombreux organismes marins vivent déjà dans des zones où le pH de l'eau de mer est plus acide ou plus basique que pH 8.1. Pas besoin d'attendre l'an 2100!

- **Le pH varie grandement avec la température.** Donner un pH moyen pour la Terre entière n'a aucun sens, vu que les masses océaniques changent constamment de température. Par exemple, prenons de l'eau de mer à 35‰ de salinité, avec une alcalinité totale de 2300 micromoles/kg, et 2000 micromoles/kg de carbone inorganique dissous (DIC). A 25°C le pH est de 8.05, à 20°C il est de 8.13 et à 15°C il est de 8.21. Cela veut dire qu'entre l'été et l'automne, le pH d'un endroit donné peut varier de 0.16 unités...

- **Le pH moyen actuel est inconnu.** Contrairement à la température moyenne globale, déterminée par deux réseaux de satellites, ainsi que deux séries thermométriques terrestres remontant à 1880, aucune série temporelle de longue durée n'existe pour le pH de l'eau de mer. Ceci est expliqué par la difficulté de mesurer le pH de manière automatique avec une grande précision. Il n'est pas non plus possible de mesurer le pH par satellite. Les quelques séries de mesure de pH disponibles pour l'eau de mer ne concernent que quelques endroits dans le monde. Il est donc impossible de connaître quel serait le pH moyen des océans actuels, encore moins celui du passé.

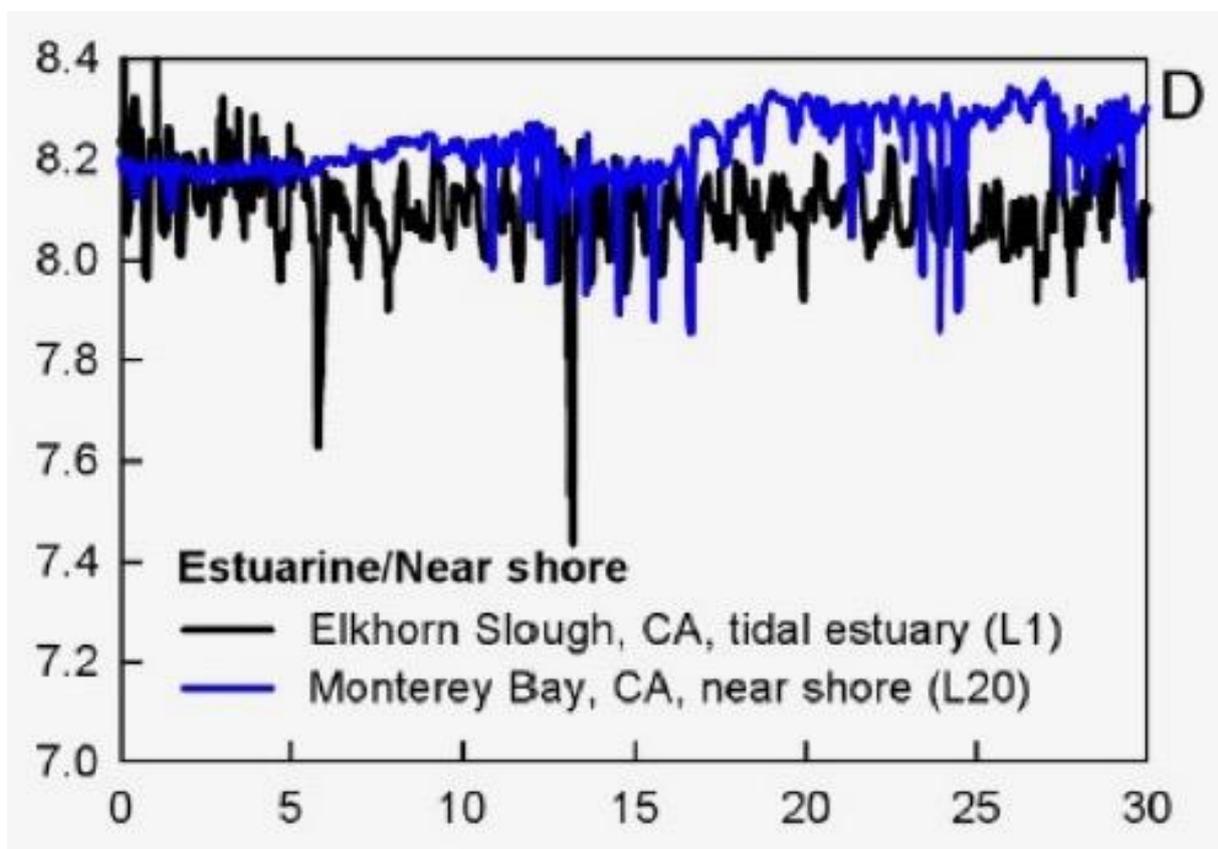
- **Le pH de l'eau de mer diminue avec la profondeur.** Un pH de 7.8 est déjà atteint vers 100 mètres de profondeur, voire moins. De nombreux organismes vivent dans cette zone et n'en sont pas affectés (voir figure ci-dessous).



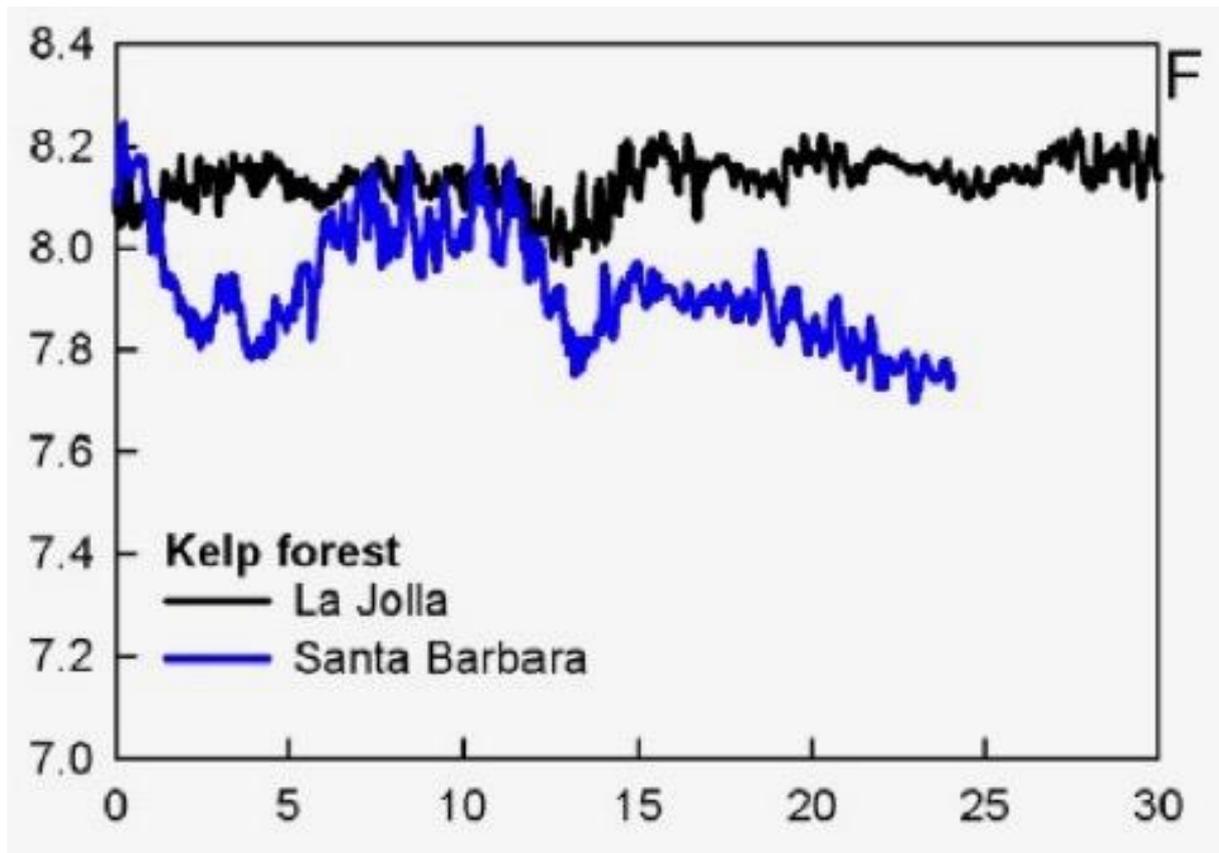
Transect de pH dans l'Océan Pacifique Nord, entre 25°N et 55°N, depuis la surface jusqu'à 6000 m de profondeur (Byrne et al. 2010).

Les courants de remontée d'eau profonde (les « upwellings »), dépendant des vents, vont donc ramener de l'eau acide vers la surface, en modifiant localement le pH de l'eau de mer; l'upwelling va aussi provoquer de nombreuses modifications dans la structure des communautés phyto- et zooplanctoniques, car ces courants d'upwelling sont riches en nutriments. Un bel exemple est la zone d'upwelling située face aux côtes de l'Equateur en Amérique du Sud.

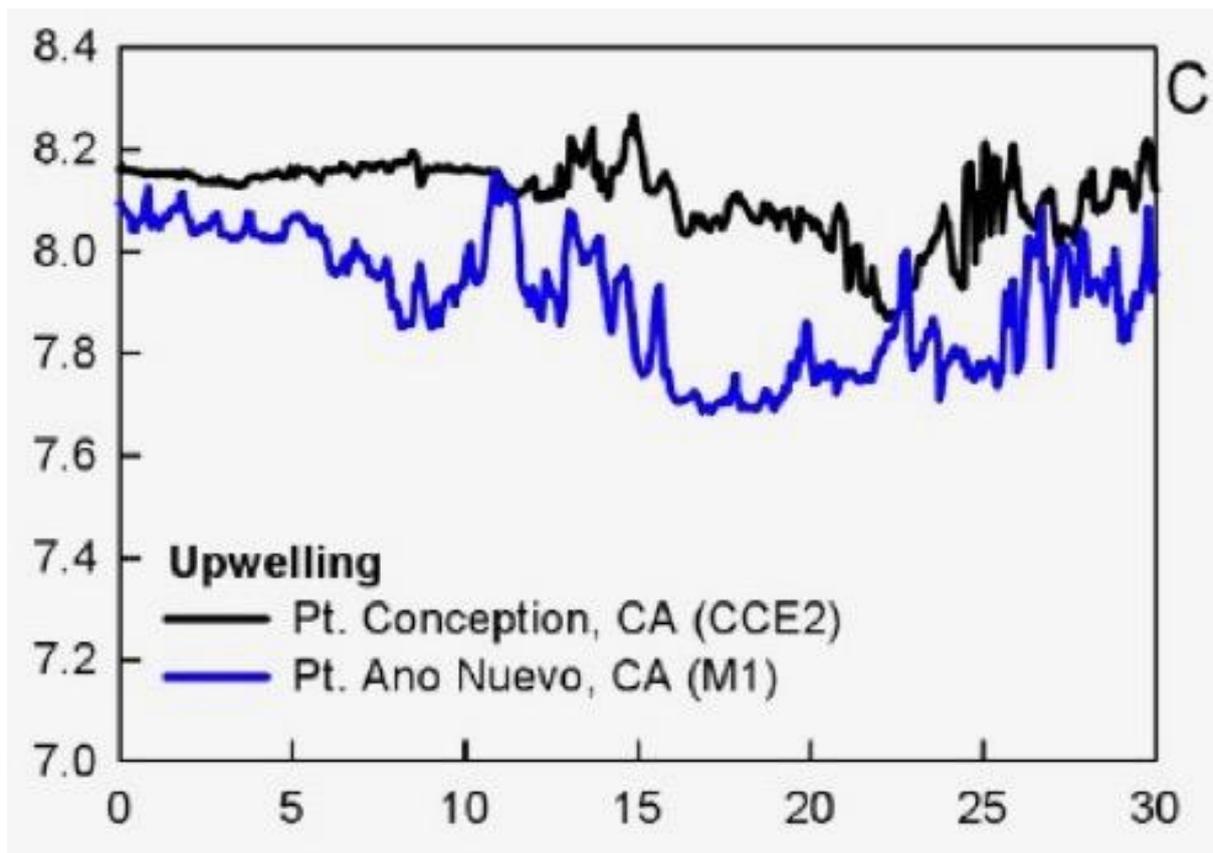
• **Le pH de l'eau de mer varie énormément.** Si l'on suit le pH de l'eau de mer à un endroit précis pendant 30 jours on peut se rendre compte des grandes variations de pH au niveau local. Ceci a été démontré par l'équipe de Hofmann en 2011 . Les variations mensuelles de pH de l'eau de mer dépassent très souvent 0.1 unité de pH. Le pH des zones côtières, c'est-à-dire les zones comportant la plus grande biodiversité marine, voient parfois leur pH varier de 0.5 à 1.0 unités en seulement quelques jours. Ceci n'affecte pas les organismes qui sont tous très bien adaptés aux variations naturelles du pH. Le pH des zones centrales des océans est par contre beaucoup plus stable.



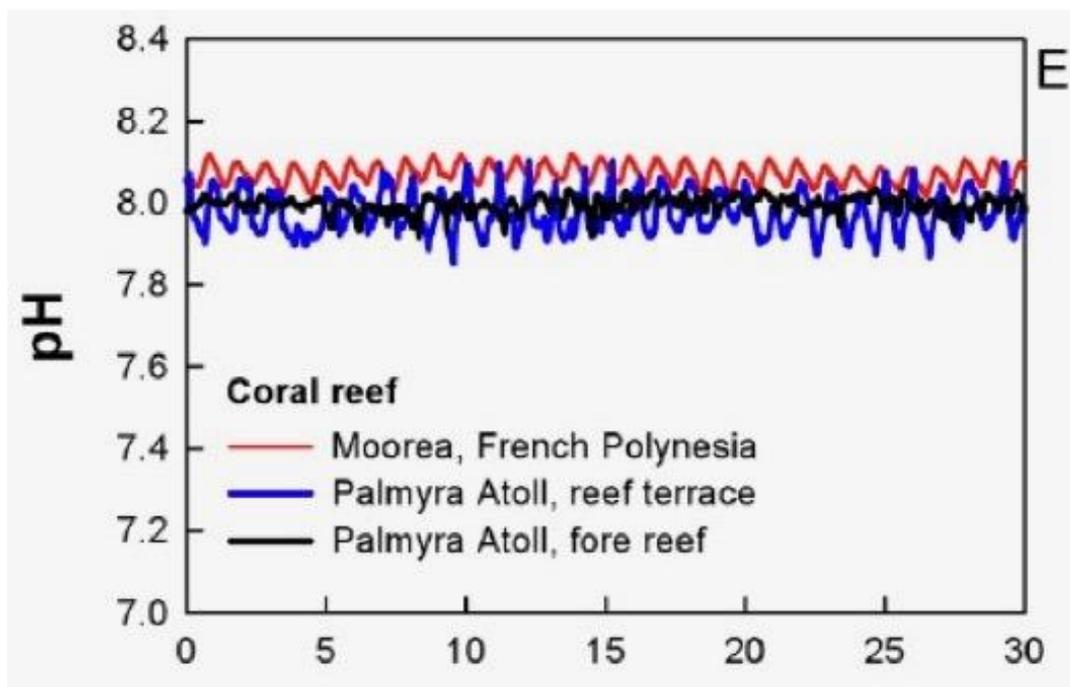
Variation naturelle du pH dans deux zones côtières (Hofmann et al. 2011). L'axe des x représente des jours. Les variations sont ici de 0.5 à 1.0 unités!



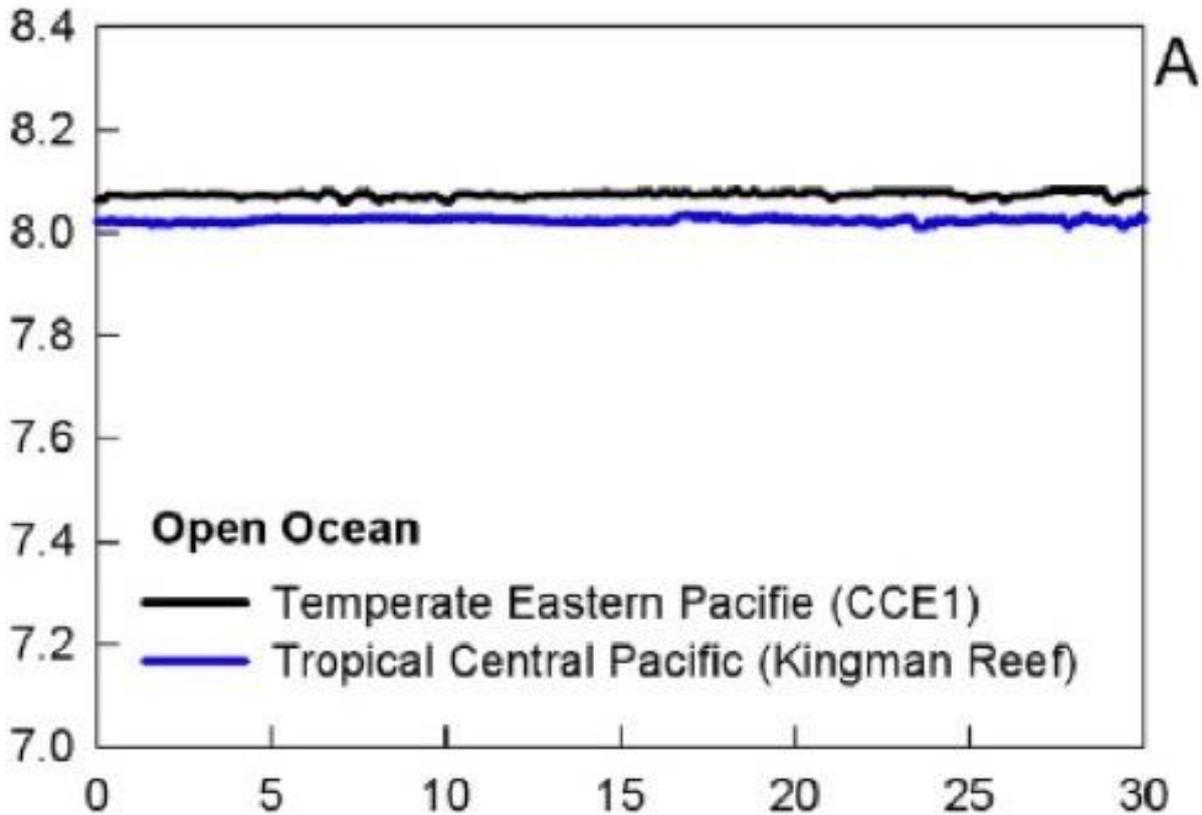
Variation naturelle du pH dans deux zones de forêts de kelp (Hofmann et al. 2011). L'axe des x représente des jours.



Variation naturelle du pH dans deux zones d'upwelling (Hofmann et al. 2011). L'axe des x représente des jours. Les variations sont ici de 0.3 à 0.4 unités.



Variation naturelle du pH dans deux récifs coralliens (Hofmann et al. 2011). L'axe des x représente des jours. Le pH varie ici de 0.1 à 0.2 unités.



Variation naturelle du pH au centre de l'Océan Pacifique (Hofmann et al. 2011). L'axe des x représente des jours. Le pH ne varie ici que de 0.025 unités.

- **Les organismes du phytoplancton et du zooplancton**, mais aussi du bactérioplancton, ont tous une grande influence sur la  $p\text{CO}_2$  (pression partielle en  $\text{CO}_2$ ), l'alcalinité et le pH de l'eau de mer. Par exemple, la photosynthèse effectuée par le phytoplancton consomme du  $\text{CO}_2$  (aq) ce qui tend à provoquer une augmentation du pH; la respiration de la matière organique par les bactéries et par le zooplancton génère du  $\text{CO}_2$  (aq) ce qui tend à provoquer une diminution du pH; la fabrication de coquilles carbonatées (par exemple par les coccolithophoridés) consomme du  $\text{CO}_3^{2-}$  alors que la dissolution en génère, ce qui tend aussi à faire varier le pH de l'eau de mer. La prolifération de tous ces organismes dépend de la présence de nutriments, de la température, de l'ensoleillement, mais aussi de la présence de prédateurs et de virus. L'eau de mer est loin d'être de l'eau pure et tous les organismes influencent le pH.

- **Le biotope change constamment et les organismes s'adaptent constamment au biotope.** Ceci avait déjà été constaté par Lamarck et bien entendu Darwin qui en parle longuement dans son célèbre livre publié en 1859. Les organismes évoluent sans cesse et les mieux adaptés au biotope survivent, les autres disparaissent. Dire que le pH de l'eau de mer devrait être stable, ainsi que le climat, est simplement nier toute l'évolution biologique qui ne peut se faire que dans un milieu qui varie au cours du temps. Toutes les populations animales sont capables de s'adapter aux petites variations de pH, de température ou de concentration en  $\text{CO}_2$  que nous connaissons actuellement. Aucun vrai biologiste ne peut penser sérieusement que 0.1 ou 0.5 unités de pH de plus ou de moins dans 100 ans serait un problème, sauf les « biologistes » qui nient la théorie de l'évolution. Les populations animales peuvent s'adapter, par exemple leur aire de répartition variera, et de toute façons les individus les moins adaptés seront éliminés.

• **Modèles informatiques hasardeux.** Ce sont des modèles informatiques qui prédisent le pH en 2100. Cependant, les prévisions sur le futur de notre planète sont pour le moins hasardeuses car de très nombreux paramètres influencent le pH. Comme le souligne le physicien Jacques Duran : « nous avons affaire à un énorme système d'équations différentielles à coefficients inconnus, non linéaires et couplées entre elles. Ces systèmes d'équations sont donc très difficiles à résoudre. En plus, certaines de ces équations se comportent de manière chaotique, c'est-à-dire qu'elles sont très sensibles aux conditions initiales souvent inconnues. Il n'y a pas pire. Pourtant, les programmeurs sur ordinateurs s'en donnent à cœur joie avec des milliers de paramètres inconnus et la forme des équations maîtresses qu'il faut essayer de deviner. Disons gentiment que, comme toujours, ils obtiennent des résultats mais le problème c'est que l'on peut faire évoluer les résultats comme on le désire en changeant un seul des paramètres ou une seule des équations inconnues. La croyance dans la véracité de telle ou telle prédiction d'ordinateur relève plus de la foi que de la certitude scientifique. Etant donné la multiplicité des méthodes de résolution possibles, les équations hasardeuses et le nombre de paramètres injectables, les résultats des simulations sur ordinateur sont très difficilement contrôlables par quiconque ne les a pas programmées lui-même. Bref, on nage dans le flou et les partis-pris prennent le dessus. Pour leur part, les politiques et les écologistes choisissent les résultats qui leurs conviennent, mais ils ignorent tout des nombreuses incertitudes, des approximations et des problèmes que posent les méthodes qui ont été employées. »

#### Références

Byrne RH et. al. 2010. Direct observations of basin-wide acidification of the North Pacific Ocean. *Geophys Res Lett* 37, L02601.

Caldeira, K. & Wickett, M. E. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425, 365 (2003).

Duran Jacques. <http://www.pensee-unique.fr/theses.html>.

Hofmann GE, Smith JE, Johnson KS, Send U, Levin LA, et al. (2011) High-Frequency Dynamics of Ocean pH: A Multi-Ecosystem Comparison. *PLoS ONE* 6(12): e28983. doi:10.1371/journal.pone.0028983.

## [2. La plupart des études exagèrent les effets de l'acidification de l'océan](#)

Mis en ligne SCE : 04.03.2022

L'ajout de quantités importantes de CO<sub>2</sub> dans l'océan ne peut que légèrement 'acidifier' l'océan, en provoquant une diminution du pH sans pour autant rendre l'océan 'acide'. Pour que les effets de dissolution 'acide' puissent avoir lieu, par exemple sur les coquilles ou tests de la plupart des invertébrés marins, le pH doit être inférieur à 7,0. Or aujourd'hui on en est loin, la valeur étant de 8,1 alors qu'elle était probablement de 8,25 en 1750.

Pourtant les médias et de nombreux scientifiques n'hésitent pas à grossir le trait, annonçant quasi-quotidiennement les pires scénarios pour l'effondrement des écosystèmes et la perte irrémédiable de la biodiversité. Cette exagération, le plus souvent (mais pas toujours !) inconsciente, fait partie de **l'Effet de Déclin**, inhérent à la méthode scientifique (par exemple [ici](#)).

Qu'en est-il finalement de l'acidification : alarmisme ou non ? Nous allons constater que cet alarmisme, surtout médiatique, n'est pas justifié concernant les poissons et a été alimenté par une dérive bien connue de l'approche scientifique liée à ce que l'on appelle **l'Effet de Déclin**. Cet effet,

qui sévit également dans les sciences sociales et les sciences psychologiques, a également frappé les sciences biologiques lorsque les relations entre les organismes marins et l'acidification furent étudiées il y a environ 15 ans.

## 2.1. Introduction

Le thème de l'acidification a déjà été abordé par SCE : rappelons d'entrée de jeu ([ici](#)) que les mesures directes de pH sont récentes et nous n'avons aucun recul historique suffisant. Selon les médias et les ONG écologistes, qui se basent sur le GIEC et sur certaines publications (e.g., [Caldeira & Wickett 2003](#)), le pH des océans aurait été de 8,25 en 1750. Cependant, il faut savoir que personne n'a jamais mesuré le pH des océans en 1750, puisque **le concept de pH n'a été inventé qu'en 1909** (par le danois Søren P.L. Sørensen), et que les premiers appareils fiables pour mesurer le pH ne sont apparus qu'en 1924... ! Nous ne sommes donc pas certains de cette valeur de 8,25 pour 1750... La valeur de 8,25 est en fait obtenue par des mesures indirectes, par calcul, et n'est donc pas certaine. De plus, à l'heure d'aujourd'hui, tous les pH sont possibles dans l'océan. Lorsqu'on dit que les océans actuels sont à un pH de 8,1, de quel océan parle-t-on? S'agit-il du pH moyen global? Si c'est de cela dont on parle, quelle est l'incertitude sur la mesure? (i.e., l'écart-type?). Ceci n'est jamais indiqué! Il faut savoir que si l'on prend un jour de la semaine, tous les pH sont possibles dans les océans, comme l'illustre très bien la figure suivante (Figure 1) :

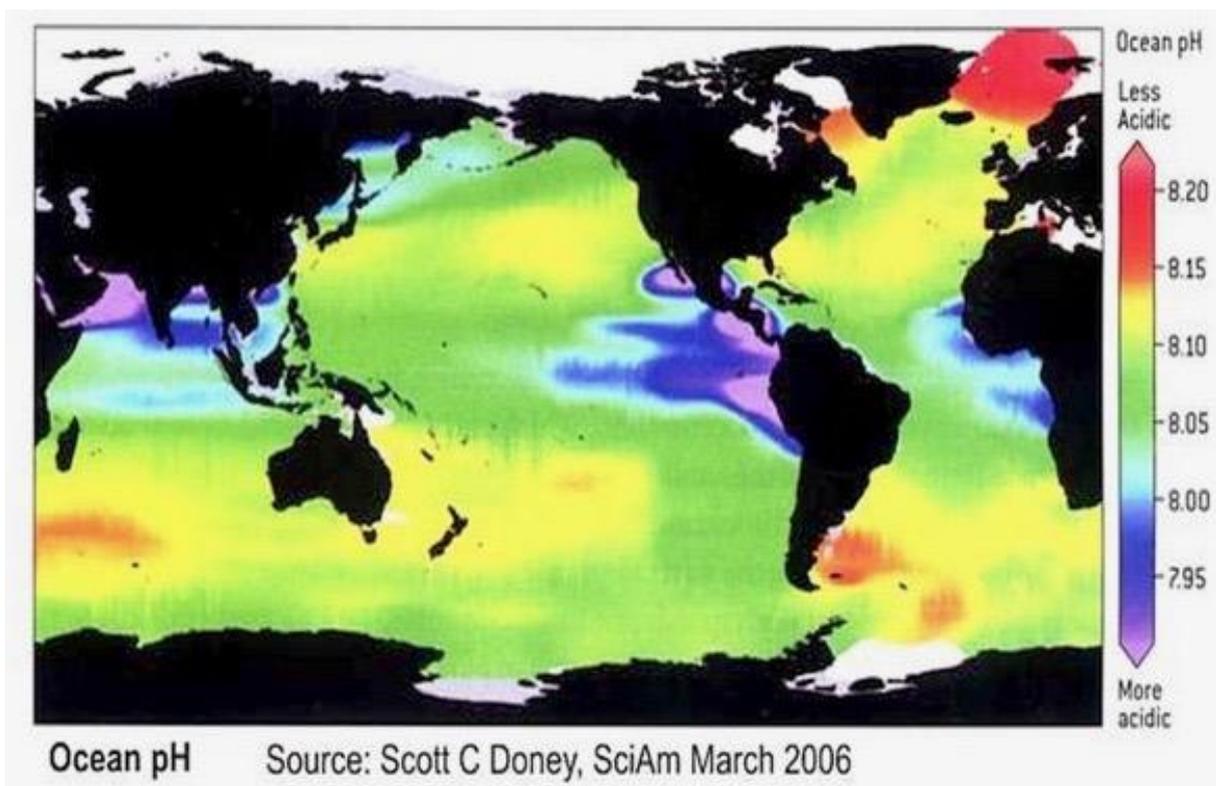


Figure 1 : Nous voyons par exemple que nous avons des zones à pH 7,8, d'autres à 8,1 et encore d'autres à 8,2 voire plus. De nombreux organismes marins vivent déjà dans des zones où le pH de l'eau de mer est plus acide ou plus basique que pH 8,1. Pas besoin d'attendre l'an 2100! ([in SCE, 2018](#))

Ces incertitudes concernant le pH sont l'un des fondements à l'origine de l'article de [J. Clements](#) et al. (2022) (*in PLOS Biology*) consacré à l'**Effet de Déclin** et aux variations éventuelles du

comportement des poissons récifaux attribuée à l'acidification. **Malgré l'absence d'expériences d'acidification sur le comportement de nombreux poissons, une généralisation est faite et le tout est relayé tel quel dans la littérature scientifique, souvent même dans des revues à fort impact et les médias.** Pour Clements et al. (2022), les conclusions des études rapportées dans la littérature scientifique sont simplement fausses ou très fortement exagérées, suite à l'absence d'expériences sur le sujet et à des échantillonnages de populations très faibles.

Cette dérive ou 'précipitation' dans l'interprétation des données fait partie de la notion d'Effet de Déclin (décrit pour la première fois en 1930 par [Rhines](#), voir également [Schooler, 2011](#)), et définie par Peter Ridd comme ceci : *'This problem with exaggeration of threats applies to many areas of science and has a name: The Decline Effect. The Decline Effect goes like this: an early report, usually attracting huge media interest, predicts some sort of catastrophe. But when follow up work is done, usually with far better experimental procedure and far greater numbers of samples, the original report turns out to be wrong'*.

Un exemple très clair nous est fourni avec certaines études menées à la Grande Barrière Récifale d'Australie (nombreuses références dont [Anderson et al. \(2015\)](#) et [Marhohasy et Abbot \(2018\)](#)). Ces études démontrent que les stades larvaires des coraux ne sont en fait pas affectés par une diminution du pH, ni par une augmentation du CO<sub>2</sub> ou d'une combinaison avec la température. **D'autres organismes marins calcifiants (mollusques, crabes) ou non (poissons clowns, algues) associés à la Grand Barrière ont également été étudiés *in situ* et montrent une faculté d'adaptation à une diminution du pH, avec souvent même un renforcement de la calcification (mollusques), un accroissement de leur productivité (algues) ou de la reproduction (poissons clowns).** Ces résultats vont donc à l'encontre des expériences de laboratoire, qui portent généralement sur un seule espèce, hors de tout écosystème naturel, pendant un temps court, et qui ne permettent pas de considérer le potentiel réel d'adaptation dans le milieu naturel, ni les nombreux cycles agissant continuellement dans le milieu marin.

Revenons à l'étude de [J. Clements](#) et al. (2022). Plus de 300 articles par année, en progression exponentielle depuis 2006, sont consacrés aux impacts potentiels de l'acidification océanique. Parmi ceux-ci, [Kroeker et al. \(2010\)](#) estiment que cette acidification a généralement d'importants effets négatifs sur les organismes, à tempérer (selon ces auteurs) par la sensibilité des différentes espèces marines. De nombreux autres articles dans des revues de haut rang (réf. dans Clements et al. 2022) concluent que l'effet de l'acidification a de fortes conséquences sur le comportement des poissons entraînant des conséquences écologiques négatives.

**Ces résultats, basés sur des travaux de laboratoire furent médiatisés à outrance jusqu'à être présentés à la Maison Blanche ([Roberts, 2015](#)).** Ainsi face à cet alarmisme qui ne souffrait d'aucune doute, bien que les résultats s'appuient sur des expériences effectuées en dehors du milieu naturel, plusieurs millions de dollars furent injectés par des instances internationales afin de quantifier les impacts de l'acidification sur le comportement des organismes marins.

Cependant, de nombreux articles ont ensuite mis en cause cet alarmisme et la fiabilité des premières études consacrées à l'acidification. Une des premières études ayant mis en doute ces résultats fut celle de [Browman \(2016\)](#) qui souligne notamment que les études qui montrent une absence d'effet ne sont généralement pas publiées (ou ne peuvent pas l'être), et surtout qu'encore aujourd'hui les mécanismes de calcification restent peu connus chez de nombreuses espèces. **Même constat réalisé par [Clark et al. \(2020\)](#), pour qui le taux d'acidification actuel n'a que des effets négligeables sur les poissons récifaux.** Ce sont ces points qui font l'objet de la discussion de Clements et al. (2022). Cet article montre que les effets initiaux de l'acidification sur le comportement des poissons ont

pratiquement disparu au cours des cinq dernières années et que des biais courants influencent les résultats rapportés dans ce domaine. Les auteurs discutent ensuite des moyens d'atténuer ces biais.

## 2.2. Méthodes

Un **effet de déclin** se produit lorsque une première analyse semble révéler un effet majeur, mais lorsque des analyses plus tardives et souvent plus poussées révèlent qu'en fait nous avons un effet mineur, voir plus aucun effet.

Pour évaluer si un **effet de déclin** était présent ou non dans la littérature concernant l'effet de l'acidification sur le comportement des poissons, 4411 études sur le sujet ont été récupérées **entre 2009 et 2018** en utilisant Scopus et Google Scholar. Les mots clés "ocean acidification fish behavio(u)r" et "elevated CO<sub>2</sub> fish behavio(u)r" ont été utilisés. Au final, après analyse des publications, seulement 91 publications ont été retenues par les auteurs pour leur méta-analyse car beaucoup d'études ne comportaient pas de données quantitatives, étaient consacrées à des invertébrés, ou étaient des reviews. Beaucoup d'études apparaissaient également plusieurs fois dans les 4411 articles de départ. Ensuite, pour chaque publication retenue, les effets comportementaux observés sur des poissons placés dans de l'eau légèrement acidifiée ( $X_E$ ) ont été comparés aux effets comportementaux de poissons contrôles, placés dans de l'eau normale ( $X_C$ ). Un rapport est ensuite calculé de la manière suivante :

$$\ln RR = \ln(X_E/X_C)$$

Le rapport a été appelé *RR* par les auteurs de l'article (pour « Response Ratio »). Le logarithme népérien de ce rapport a ensuite été calculé (afin d'éviter de manipuler de trop grands ou de trop petits chiffres) et la valeur absolue a finalement été sélectionnée. Les résultats obtenus par les auteurs étaient donc toujours un chiffre positif compris entre 0 et 15. Les *lnRR* ont ensuite été présentés dans un graphique en fonction de l'année de publication. Il y a donc autant de points que d'études publiées sur le comportement des poissons.

Cependant, visualiser un effet éventuel d'acidification sur 10 poissons n'est pas la même chose que d'évaluer cet effet sur 100 poissons. Les études analysant un grand nombre d'individus offrent donc des résultats plus rigoureux et probablement plus proches de la réalité. Les auteurs ont donc également normalisé le *lnRR* avec les nombres de poissons considérés dans chacune des études.

## 2.3. Résultats

### 2.3.1. Processus biologiques

Sur la base d'une revue systématique de la littérature et d'une méta-analyse (n = 91 études), les preuves de l'Effet de Déclin dans les études de l'acidification des océans sur le comportement des poissons sont claires (Figure 2 ci-dessous, = Fig 1a et 1b in Clements et al. 2022).

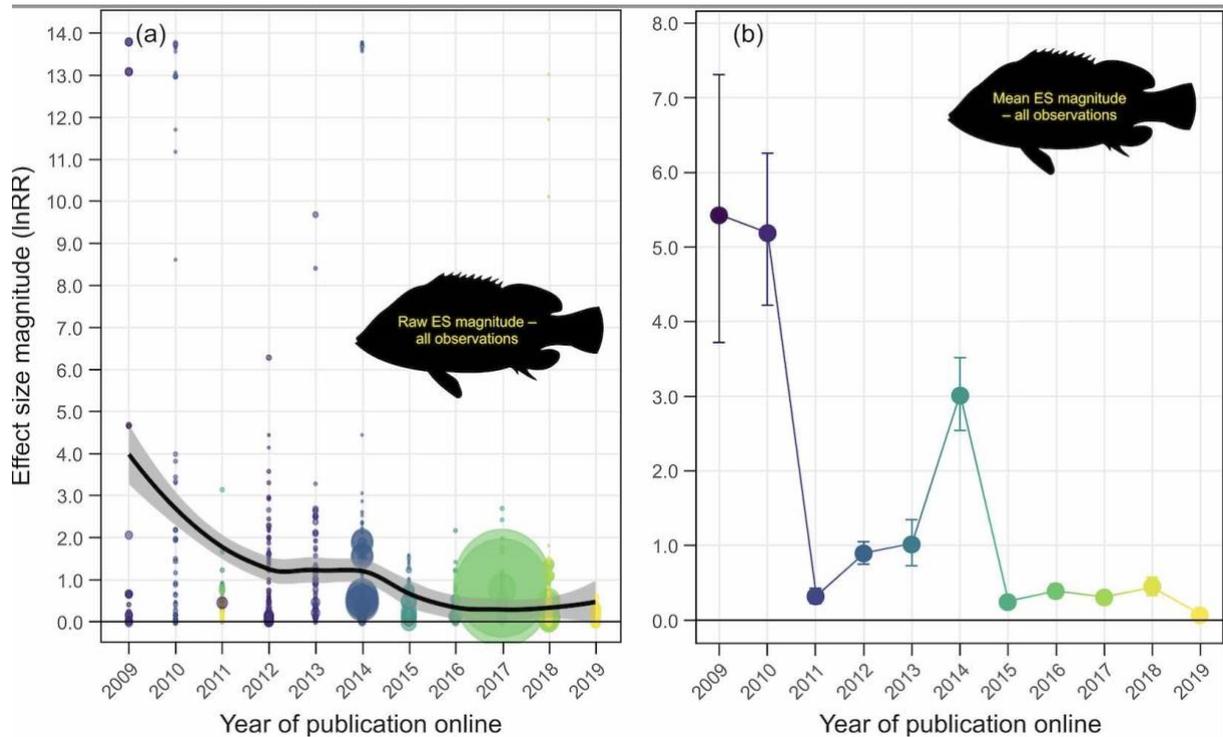


Figure 2. Effet de déclin sur l'acidification des océans sur le comportement des poissons. **(a)** Tendence des magnitudes brutes de l'ampleur de l'Effet (InRR absolu) pour chaque expérience de l'ensemble des données en fonction de l'année de publication en ligne et codée par couleur selon l'étude (voir codes in Clement et al., 2022). Les données sont ajustées par une courbe de Loess avec limites de confiance à 95 %. **(b)** Mesures normalisées avec les tailles d'échantillons (« weighted mean effect size ») et comportant des limites de confiance (supérieure et inférieure) pour chaque année de publication. Note : Les couleurs pour (b) sont de nature esthétique et suivent un gradient en fonction de l'année de publication. Les données sources pour chaque graphique de la figure se trouvent dans les données S1 (in Clement et al., 2022). Abréviation : ES, taille de l'Effet.

En considérant les mesures normalisées par la taille des échantillons (Figure 2b), nous pouvons voir que l'effet de l'acidification sur le comportement des poissons (InRR) a diminué d'un ordre de grandeur au cours de la dernière décennie, passant d'une ampleur moyenne de  $>5$  en 2009 et 2010 à une ampleur  $<0,5$  après 2015 (Figure 1b). **L'ampleur de la taille d'Effet moyenne était donc disproportionnée dans les premières études réalisées en 2009, a ensuite oscillé autour de tailles d'Effet modérées de 2012 à 2014, et a pratiquement disparu ces dernières années (Fig. 2a et 2b).**

Les fortes amplitudes de l'Effet de Déclin des premières études sur l'acidification et le comportement des poissons ne sont pas présentes dans la majorité des études des cinq dernières années (Fig 2b ici et Tableau S1 in Clement et al. 2022). **Cet Effet de Déclin pourrait s'expliquer par un certain nombre de facteurs, notamment biologiques.** Par exemple, les poissons d'eau froide des régions tempérées connaissent un degré plus élevé de variabilité temporelle des paramètres de la chimie des carbonates sur de grandes zones spatiales (Kwiatkowski et Orr, 2018). Par conséquent, ils peuvent être moins sensibles aux changements du  $\text{CO}_2$  de l'eau de mer (Baumann, 2019). En conséquence, si un nombre croissant d'études sur les espèces d'eau froide au fil du temps était responsable de l'Effet de Déclin, la suppression des espèces d'eau froide de l'ensemble de données (en ne gardant plus que les seules espèces d'eau chaude) devrait entraîner la disparition de la tendance de l'Effet de Déclin. Mais les auteurs montrent que l'Effet de Déclin persiste lorsque seules les espèces d'eau chaude sont prises en compte (Fig. 3a). De même, les effets les plus marqués de l'acidification des océans sur le comportement des poissons ont sans aucun doute été rapportés pour leurs réponses aux signaux

chimiques (ici « olfactifs »), et un nombre croissant d'études sur les comportements non olfactifs pourrait aussi expliquer l'Effet de Déclin. Encore une fois, si c'était vraiment le cas, la suppression des comportements non olfactifs de l'ensemble des données devrait annuler la tendance à l'Effet de Déclin. Là encore, ce n'est pas le cas (Fig. 3b). Enfin, les premières études sur l'acidification des océans et le comportement des poissons ont utilisé des larves, qui sont généralement considérées comme plus sensibles aux perturbations environnementales que les juvéniles et les adultes. Si une plus grande proportion d'études utilisait des stades de vie moins sensibles au fil du temps, alors le fait d'éliminer ces stades de vie et de se concentrer exclusivement sur les larves devrait abolir l'Effet de Déclin. Une fois de plus, ce n'est pas le cas (Fig. 3c). **Ces analyses montrent donc que les études d'acidification des océans sur le comportement des poissons présentent un Effet de Déclin qui ne peut s'expliquer par les trois processus biologiques généralement considérés comme des moteurs importants des effets de l'acidification** (Fig. 3a-3c in Clements et al. 2022, Tableau S1, in idem).

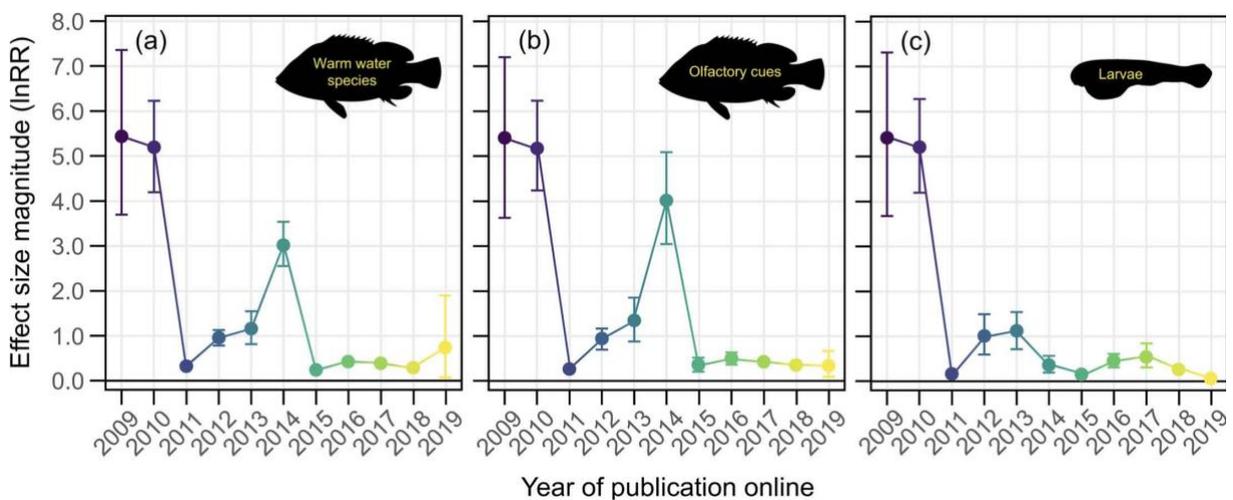


Figure 3. L'Effet de Déclin ne peut pas être expliqué par trois facteurs biologiques communément considérés comme des effets de l'acidification. Ampleur moyenne de l'ampleur de l'effet (lnRR absolu  $\pm$  limites de confiance supérieure et inférieure) en fonction du temps pour les ensembles de données comprenant uniquement des expériences avec (a) des espèces d'eau chaude, (b) des comportements associés à l'olfaction et (c) des stades larvaires. L'ampleur moyenne des effets et les limites de confiance ont été estimées à l'aide de simulations bayésiennes et d'une distribution normale repliée. Note : Les couleurs sont de nature esthétique et suivent un gradient en fonction de l'année de publication en ligne. Les données sources pour chaque panneau de la figure peuvent être trouvées dans S1 Data et <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511.g003> (in Clement et al., 2022).

Il existe donc d'autres facteurs potentiels qui pourraient être à l'origine de l'Effet de Déclin, mais ils ne sont pas facilement testables à partir de la base de données de Clements et al. (2022). Citons l'influence de la variabilité du CO<sub>2</sub> en comparant les espèces d'eau froide et d'eau chaude, difficile à tester car la plupart des études ne rapportent pas les niveaux réels de CO<sub>2</sub> auxquels les animaux expérimentaux (et leurs ancêtres) ont historiquement été confrontés. **Il n'est donc pas possible de tenir compte des conditions historiques d'acclimatation au CO<sub>2</sub> des organismes marins utilisés dans les expériences.** L'impact de ce facteur sur l'Effet de Déclin observé pourrait provenir d'une proportion croissante d'études utilisant des poissons élevés en captivité dans des systèmes d'aquarium en recirculation avec des taux de CO<sub>2</sub> élevés, par rapport aux poissons provenant de populations sauvages avec des taux de CO<sub>2</sub> naturels. Il sera donc nécessaire à l'avenir de mieux

connaître les taux de CO<sub>2</sub> à la fois naturels et expérimentaux, c'est-à-dire de mieux contraindre la chimie des carbonates ([Riebesell et al., 2011](#)).

### 2.3.2. Les biais d'analyse dans un domaine en pleine maturation

Il est clair que le domaine de l'acidification des océans, et en fait la science en général, est sujet à de nombreux biais, y compris des biais méthodologiques et de publication ([Browman, 2016](#)). **Ce qu'il faut retenir, c'est que si la science fonctionnait correctement dès le départ et que les premiers effets de l'acidification des océans sur le comportement des poissons étaient vrais, les relations présentées aux figures 2 et 3 présenteraient des lignes plates montrant des tailles d'effet cohérentes dans le temps.** Il est également évident que l'Effet de Déclin découvert ici n'est pas explicable par les trois processus biologiques probables (décrits ci-dessus). Ainsi, les données présentées par Clements et al. (2022) constituent-elles un exemple typique d'un domaine nouveau et émergent, celui d'un sujet d'actualité, susceptible d'être biaisé. **Les auteurs ont donc évalué les rôles de trois biais potentiels : (1) les biais méthodologiques ; (2) les biais de publication sélective et (3) les biais de citation.** Ils considèrent ensuite l'influence potentielle des auteurs/chercheurs dans l'évolution de l'Effet de Déclin.

### 2.3.3. Les biais méthodologiques.

Les approches méthodologiques des études individuelles, et les biais qu'elles comportent, peuvent contribuer à l'inflation précoce des tailles d'Effet. Ces biais peuvent prendre la forme de protocoles expérimentaux, de la conception expérimentale choisie et de la taille des échantillons, ainsi que de l'approche analytique/statistique employée. **Les biais de l'expérimentateur peuvent également contribuer à gonfler les effets.**

Les plans et protocoles expérimentaux peuvent introduire des biais non désirés pendant l'expérience, que les chercheurs s'en rendent compte ou non. Par exemple, **les expériences portant sur des échantillons de petite taille sont plus sujettes aux erreurs statistiques**, et les études portant sur des échantillons de grande taille devraient être plus fiables que celles portant sur des échantillons de petite taille ([Columb et Atkinson, 2016](#)) qui mènent à un résultat expérimental prédéterminé, ce qui peut contribuer à gonfler les Effets ([Head et al., 2015](#)). L'analyse de Clements et al. (2022) montre que la quasi-totalité des études (13 études sur 15 soit 87%) présentant les tailles d'Effet les plus importantes (Effet > 1,0) avaient des tailles d'échantillon moyennes (par traitement expérimental) inférieures à 30 poissons. (Figure 4). De même, le nombre d'études rapportant une taille d'effet >0,5 a fortement diminué après que la taille moyenne de l'échantillon ait dépassé 30 poissons (Figure 4). **La taille de l'échantillon n'est bien sûr pas le seul attribut qui décrit la qualité d'une étude, mais les effets détectés suggèrent certainement que les études avec n < 30 poissons par traitement peuvent produire des effets fallacieux et devraient être pondérées en conséquence.**

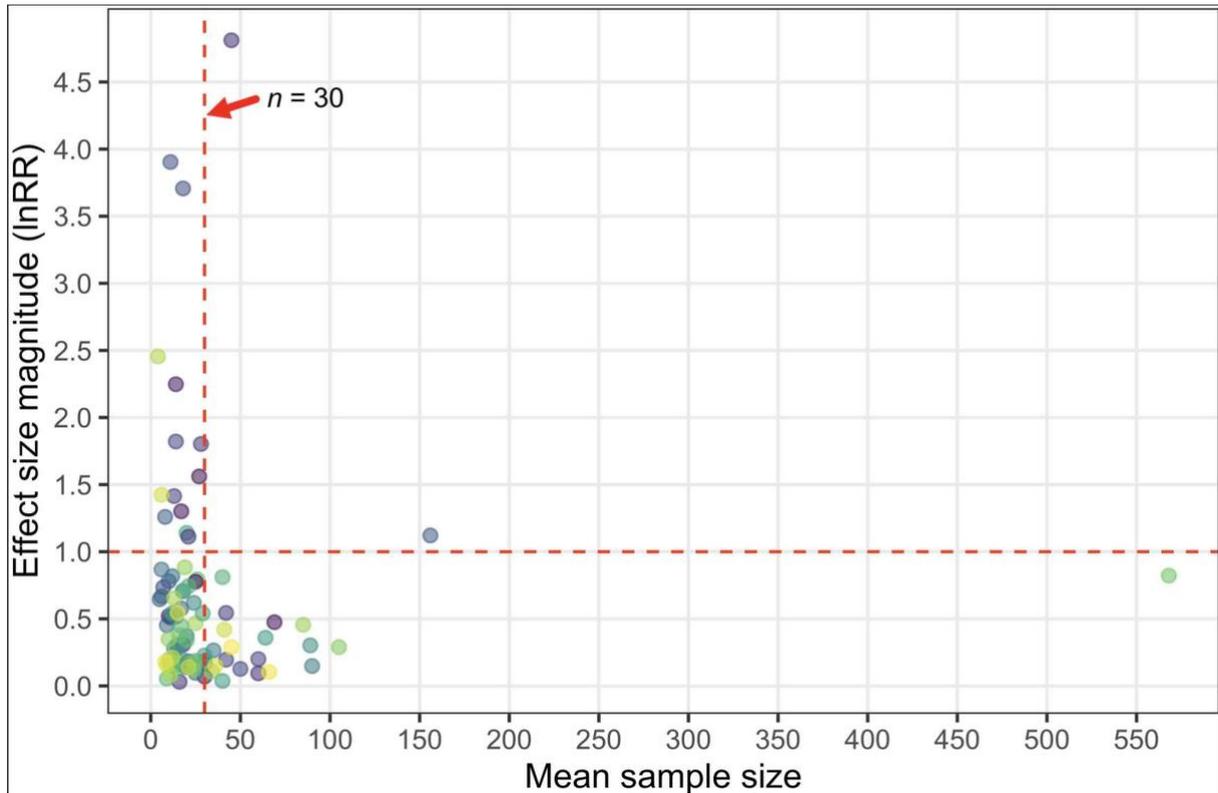


Figure 4. Les études présentant des tailles d'Effet importantes ont tendance à présenter des tailles d'échantillon faibles. La figure donne l'ampleur moyenne de la taille de l'Effet (lnRR absolu) pour chaque étude en fonction de la taille moyenne de l'échantillon de chaque étude (c'est-à-dire la taille de l'échantillon par traitement expérimental). Notez que la taille d'Effet moyenne pour une étude donnée n'est pas une taille d'effet pondérée, mais est simplement calculée comme la moyenne des tailles d'effet individuelles pour une étude donnée. La ligne pointillée rouge verticale indique une taille d'échantillon de 30 poissons, tandis que la ligne pointillée rouge horizontale représente une magnitude de lnRR de 1. Les données sources pour chaque panneau de la figure se trouvent dans S1 Data in Clement et al., 2022.

Le biais de l'expérimentateur/de l'observation pendant la collecte des données peut sérieusement fausser les résultats de la recherche comportementale (Marsh et al., 2007). La plupart des publications évaluant les effets de l'acidification des océans sur le comportement des poissons, y compris les premières études rapportant des tailles d'Effet importantes, ne sont pas des études randomisées réalisées en double aveugle. L'expérimentateur doit en effet réaliser ses expériences sans savoir s'il analyse un poisson dans de l'eau acidifiée ou non, sinon il peut influencer les résultats. Étant donné que les déclarations faites par les auteurs des études peuvent être trompeuses, un appel a également été lancé en faveur de preuves vidéo dans la recherche sur le comportement animal (Clark, 2017). De plus, la persistance d'Effets exagérés au-delà des études initiales peut être perpétuée par le **biais de confirmation**, car les études de suivi tentent à confirmer les Effets exagérés initiaux et de capitaliser sur la réceptivité des journaux à forte visibilité aux nouveaux phénomènes (apparents) (Duarte et al., 2015). Bien que l'analyse de Clements et al. (2022) ne démontre pas empiriquement que le biais de l'expérimentateur ait contribué à l'Effet de Déclin, il est possible que des biais conscients et inconscients de l'expérimentateur aient contribué à des tailles d'Effet importantes dans ce domaine.

### 2.3.4. Biais de publication et de citation.

Une autre explication importante de l'Effet de Déclin est le biais de publication sélectif, car les résultats montrant des Effets forts sont souvent publiés plus facilement, et dans des revues à fort impact, que les études montrant des résultats faibles ou nuls. Le biais de publication est sans doute l'explication la plus parcimonieuse de l'Effet de Déclin en écologie et en évolution, car les études ne montrant aucun Effet peuvent être difficiles à publier ([Jennions et Moller, 2002](#)). Cela peut être attribué au fait que les auteurs publient de manière sélective des résultats impressionnants dans des revues prestigieuses (et ne publient pas les résultats moins intéressants). Cette publication biaisée peut entraîner la prolifération d'études rapportant des effets forts, même s'ils ne sont pas forcément vrais et peut alimenter le biais de citation.

Pour déterminer si les études testant les effets de l'acidification des océans sur le comportement des poissons présentaient des signes de biais de publication et de citation, les relations entre l'ampleur de la taille de l'Effet, le facteur d'impact du journal et les citations Google Scholar peuvent être analysées en vue d'objectiver ce point (Figure 4 *in* Clements et al. 2022). Il en résulte que les Effets les plus frappants de l'acidification des océans sur le comportement des poissons ont effectivement été publiés dans des revues ayant un facteur d'impact élevé (Figure 4c *in* Clements et al. 2022). En outre, ces études ont eu une plus grande influence (c'est-à-dire une fréquence de citation plus élevée) sur ce domaine à ce jour que les études à faible impact avec des tailles d'effet plus faibles (Fig. 4d et 4e, *in* Clements et al. 2022). Des résultats similaires ont été signalés dans d'autres domaines de l'écologie et de l'évolution, notamment dans des études sur les réactions des plantes terrestres à un taux élevé de CO<sub>2</sub> ([Murtaugh 2002](#)).

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les études évaluant les impacts de l'acidification sur le comportement des poissons ont généralement des tailles d'échantillon faibles, ont tendance à être publiées dans des revues à fort impact, et sont également plus citées. **Par conséquent, la combinaison de la faible taille des échantillons et de la préférence pour la publication d'effets importants a apparemment conduit à une interprétation erronée selon laquelle l'acidification des océans aurait de vastes répercussions sur le comportement des poissons et donc des conséquences écologiques de grande ampleur** – une interprétation qui persiste dans de nombreuses études publiées aujourd'hui (Tableau S2 *in* Clements et al. 2022).

### 2.3.5. Effets des chercheurs.

**Il est important de noter que la validité scientifique des premières études publiées en 2009 et 2010 et de certains articles ultérieurs des mêmes auteurs, a récemment été remise en question** ([Ensering, 2021](#)). En effet, ces premières études ont une grande influence sur l'Effet de déclin observé dans l'analyse de Clements et al. (2022). Lorsque tous les articles rédigés ou coécrits par au moins un des chercheurs principaux de ces premières études ont été retirés de l'ensemble des données (n = 41 études, 45 %), l'Effet de Déclin n'était plus apparent de 2012 à 2019 (Figure 5 *in* Clements et al. 2022). Pour les auteurs, les futures études documentant la présence ou l'absence d'Effets de Déclin – et d'ailleurs les méta-analyses en général – devraient soigneusement examiner et évaluer si des effets de chercheur peuvent être en jeu dans un domaine d'étude donné.

### 2.3.6. Comment se comporter au mieux?

**Ces résultats suggèrent que les effets importants de l'acidification des océans sur le comportement des poissons étaient au moins en partie dus à des facteurs méthodologiques dans les premières**

**études** (par exemple, la faible taille des échantillons). En outre, la prolifération et la persistance de cette idée ont probablement été favorisés par la publication sélective de grandes tailles d'Effet par les auteurs et les revues, en particulier au début de ce domaine, et par la fréquence élevée et continue des citations de ces articles. Il est important de noter, cependant, que la faible taille de l'échantillon et la publication sélective ne peuvent pas expliquer entièrement le fort Effet de Déclin détecté, et que d'autres biais et processus peuvent être en jeu ([Clark et al., 2020](#)).

À cette fin, les auteurs préconisent que **les futures études concernant l'acidification des océans et le comportement des poissons devraient utiliser un échantillon de plus de 30 poissons par traitement** afin d'être considérées comme fiables. Il est de la responsabilité conjointe des chercheurs, des rédacteurs en chef et des évaluateurs de veiller à ce que les manuscrits soumis respectent cette directive. Pour ce faire, les auteurs doivent indiquer clairement la taille exacte des échantillons dans le texte des manuscrits, cependant, d'après l'analyse de Clements et al. (2022), 34% des études ne l'ont pas fait de manière adéquate (voir les données brutes dans S2 Data, *ibid*).

**Enfin, le fait de faire preuve d'esprit critique et de scepticisme à l'égard des premiers résultats présentant des Effets importants peut contribuer à éviter bon nombre des problèmes du monde réel associés aux effets exagérés.** Il est intéressant de noter qu'une étude récente a montré que les scientifiques expérimentés sont très précis lorsqu'il s'agit de prédire quelles études résisteront à une réplication indépendante par rapport à celles qui ne le feront pas, ce qui confirme l'idée que si quelque chose semble trop beau pour être vrai, c'est probablement le cas. Néanmoins, l'analyse des citations fournies ici suggère que les chercheurs ont été lents à adopter les études rapportant des résultats négatifs et nuls dans ce domaine, car les premières études présentant des effets importants restent les plus citées parmi tous les articles de notre ensemble de données. **Plus tôt un scepticisme sain est appliqué, moins les résultats gonflés ont un impact important sur le processus scientifique et la perception des scientifiques par le public. En fin de compte, une réplication indépendante devrait toujours être établie avant que de nouveaux résultats ne soient promus à grande échelle.**

## 2.4. REMARQUES FINALES

- Les résultats de l'article de Clements et al. (2022) démontrent que plus d'une décennie de recherche sur l'acidification des océans et le comportement des poissons est caractérisée par un **Effet de Déclin**. Bien que le domaine se situe actuellement dans une bonne approche en ce qui concerne les effets réels de l'acidification sur le comportement des poissons, il aura quand même fallu 10 ans pour y arriver. **Malheureusement, certaines études actuelles continuent de citer des études antérieures réalisées avec des tailles d'échantillons déraisonnables, probablement pour promouvoir l'idée que l'acidification aura un large impact sur le comportement et l'écologie des poissons (voir par exemple, le tableau S2 in Clements et al. 2022).** Ceci suggère qu'un changement de mentalité est encore nécessaire pour beaucoup dans ce domaine. Le chemin est donc long pour rétablir les faits (cf. les médias par exemple).

- Dans un sens plus large, ces données révèlent que **l'Effet de Déclin mérite d'être exploré en ce qui concerne d'autres phénomènes biologiques et écologiques** et un plus large éventail de disciplines scientifiques, en particulier en ce qui concerne les effets du changement global. L'exagération précoce des effets peut avoir des répercussions réelles sur le processus scientifique et sur les scientifiques eux-mêmes ([Clements, 2020](#)). Le respect des étapes décrites ici peut contribuer à atténuer ces répercussions, à parvenir plus rapidement à une véritable compréhension d'un phénomène et à progresser vers une reproductibilité accrue.

## Addendum

La méthodologie de la recherche documentaire ou de la littérature consacrée au sujet est reprise en détail dans la dernière partie de l'article de Clements et al. (2022) et accompagnée d'un organigramme, de tableaux (S3 et S4) et de quelques graphiques.

### Ci-dessous quelques articles soulignant l'effet d'exagération de l'acidification sur les organismes marins

- One New Coral Reef Study Wipes Out Four Climate Alarm Narratives In One Fell Swoop, [2022](#)
- Fishy Business : Alleged Fraud over Ocean Acidification Research, Reversal on Coral Extinction, [2021](#),
- Does ocean acidification alter fish behaviour? Fraud allegation create a sea of doubt, [2021](#),
- Claim : Ocean acidification causing coral 'osteoporosis' on iconic reefs, [2020](#),
- Coral Reefs Thrive Near Acidic Waters (pH  $\pm$  6.0). Where Seafloor Vents Emit Up To 95,000 ppm CO<sub>2</sub>, [2020](#),
- No Evidence Ocean Acidification Harms Coral Reef Fish Behavior, [2020](#),
- Ocean acidification a big problem – but not for coral reef fish behaviour, [2020](#),
- Analysis Finds Ocean Have Become LESS 'Acidic' With Rising CO<sub>2</sub>, Challenging The 'Acidification' Narrative, [2019](#),
- Ocean Acidification Background Context, [2018](#),
- A Brachiopod's Twelve-Decade response to Ocean Acidification and Warming, [2018](#),
- The Total Myth of Ocean Acidification, [2018](#).

Autres références avec le lien [ici](#).