

L'ESSENTIEL

> Plancton, mollusques, coraux et autres organismes marins calcifiants ne sont pas les seuls à être menacés par l'acidification des océans.

> Des expériences montrent que les sens des poissons-clowns, des poissons-demoiselles

et des requins se brouillent lorsqu'ils sont exposés à une eau plus acide.

> Cette confusion a un impact sur les comportements de chasse des prédateurs et de défense des proies.

L'AUTEURE



DANIELLE L. DIXON
maîtresse de conférence en science
et politique marines à l'université
du Delaware, à Newark, aux États-Unis

Poissons sous acide





UN POISSON-CLOWN QUI SE PRÉCIPITE DANS LA GUEULE DE SON PRÉDATEUR, UN REQUIN QUI ÉVITE SON METS PRÉFÉRÉ... VOILÀ CE QUI RISQUE D'ARRIVER À LA VIE MARINE EN 2100 SI L'OCÉAN CONTINUE DE S'ACIDIFIER.

Une anémone en guise de maison et un récif corallien pour quartier: c'est ainsi que vit le poisson-clown. Mais avant d'aller se nicher entre les bras

protecteurs d'une anémone, il doit accomplir un périlleux voyage. Après l'éclosion, le poisson encore à l'état de larve quitte son récif natal pour la haute mer, où il achève son développement. Il nage pendant 11 à 14 jours, puis revient élire une anémone pour domicile. Avant d'atteindre son refuge, ce jeune poisson de moins de un centimètre croise sur sa route bien des menaces: labres, poissons-lions et autres poissons des récifs, prêts à l'avaler sans autre forme de procès.

Pour filer droit jusqu'à son objectif, le poisson-clown navigue principalement grâce à son odorat et son audition. Il ne peut compter sur sa vue, car il retourne au récif en général de nuit, lorsque les prédateurs sont peu actifs ou endormis, de préférence sous une lune peu lumineuse. L'odorat est particulièrement important: grâce à lui, le poisson détecte les molécules présentes dans l'eau qui le guideront vers son objectif. Une perturbation même minime de la chimie de l'océan pourrait mettre en péril ce délicat mécanisme de survie. Les scientifiques ont donc commencé à s'inquiéter des conséquences de l'acidification des océans, liée à l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, sur ce mécanisme.

UN PRÉDATEUR? OÙ ÇA?

En 2010, mes collègues et moi avons ainsi placé 300 larves de poissons-clowns tout juste éclos dans un aquarium rempli d'eau de mer. Quand nous injectons, près des poissons âgés de 11 jours, les substances odorantes d'un poisson herbivore, ils ne réagissaient pas. Mais lorsqu'il s'agissait de l'odeur d'un prédateur, ils s'éloignaient. Nous avons répété l'expérience avec 300 nouvelles larves issues des mêmes parents, mais cette fois dans une eau où nous avons injecté du CO_2 de façon à atteindre le degré d'acidité prévu pour 2100 dans certaines parties du globe. Les poissons se sont développés normalement, mais aucun n'essayait d'éviter l'odeur du prédateur. En fait, ils avaient même tendance à nager droit dessus. Et lorsque ➤

> nous injections simultanément des odeurs de prédateurs et de non-prédateurs, les poissons semblaient incapables de s'y retrouver, nageant autant vers une source d'odeur que vers l'autre. Ils étaient capables de sentir les signaux chimiques, mais pas d'en reconnaître la signification. Ce changement de comportement est surprenant et assez préoccupant. Nous nous doutions que l'acidification des océans serait susceptible d'affecter la compréhension des stimuli chimiques, mais nous n'avions pas imaginé qu'elle pousserait un poisson à nager vers un danger imminent.

La survie de toute espèce dépend de la capacité de ses membres à remplir trois tâches fondamentales : trouver de la nourriture, se reproduire et éviter de devenir une source de nourriture. Dans des habitats aussi concentrés en espèces que les récifs coralliens, la sélection naturelle favorise d'autant plus celles capables d'échapper aux prédateurs. Dans ce contexte, toute perturbation de cette faculté peut avoir des conséquences importantes pour l'espèce, mais également pour l'écosystème corallien dans son ensemble.

Par ailleurs, si une eau de plus en plus acide interfère avec l'odorat du poisson-clown, elle pourrait aussi perturber d'autres sens. De plus, nous n'avons étudié qu'une seule espèce, mais l'odorat est important pour de nombreux organismes marins. A minima, la confusion constituerait un stress supplémentaire pour des poissons déjà confrontés à l'augmentation des températures, à la surpêche et aux perturbations des ressources alimentaires. Plus grave, si les habitants de l'océan commencent à adopter des comportements inadaptés, les chaînes alimentaires, les circuits de migration et *in fine* le fonctionnement des écosystèmes marins s'en trouveraient perturbés.

LA MENACE DU CO₂

Depuis la révolution industrielle, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 280 parties par million (ppm) pour atteindre 400 ppm aujourd'hui. Et elle serait bien plus importante sans les océans, qui en absorbent une bonne partie (*voir l'encadré page ci-contre*). Plus la concentration en CO₂ est élevée dans les océans, plus l'acidité est importante. Or si les émissions de CO₂ se poursuivent au même rythme, les eaux de surface devraient être plus acides de près de 150% en 2100 qu'aujourd'hui.

L'acidification des océans provoque la dissolution de la calcite et de l'aragonite, deux minéraux essentiels à la construction des coquilles et des exosquelettes de certains invertébrés marins. Des expériences menées par diverses équipes ont montré que des mollusques, oursins et organismes planctoniques élevés dans des aquariums remplis d'une eau contenant d'importantes concentrations de CO₂ développent des coquilles

ou des exosquelettes incomplets ou déformés. Cependant, les scientifiques pensaient que les poissons et autres organismes sans coquille échapperaient aux méfaits de l'acidification des océans. En effet, les premières recherches effectuées dans les années 1980 mettaient en évidence la capacité étonnante de certains animaux à réguler leur acidité interne en ajustant les quantités de bicarbonate et de chlorure dans leur organisme. Mais ces études s'intéressaient uniquement à la physiologie (l'aptitude d'un organisme à se développer normalement et à survivre dans une eau anormalement acide). Maintenir des fonctions de base telles que trouver de la nourriture et éviter le danger relève d'un tout autre défi. Notre groupe de recherche figure parmi les premiers à s'être attaqués à cette question : l'acidification peut-elle modifier les comportements des habitants des océans ?

DES SENS DÉFAILLANTS

Nos premières expériences menées sur le poisson-clown suggèrent fortement que l'acidification altère le comportement des animaux. Mais en plus de leur odorat, les poissons-clowns qui retournent à leur récif de nuit se fient à leur ouïe en se repérant grâce aux sons émanant du récif et des espèces qui le peuplent. C'est pour quoi, un an après nos expériences sur l'olfaction, nous avons décidé d'évaluer l'impact d'une eau plus acide sur l'audition des poissons.



Sous une forte acidité, les poissons-clowns ne comprenaient plus les stimuli auditifs



Nous avons placé de jeunes poissons-clowns (âgés de 17 à 20 jours) à l'intérieur d'une boîte dans un aquarium rempli d'eau de mer. Quand nous avons diffusé des bruits de récif enregistrés de jour (qu'ils devraient normalement éviter) à travers un côté de la boîte, les poissons se sont éloignés de la source sonore, restant quasiment les trois quarts de leur temps aux alentours de la paroi opposée. Mais lorsque nous avons recommencé l'expérience avec des poissons qui avaient passé leur courte vie dans une eau 60% plus acide – une acidité qui, selon les prévisions actuelles, sera

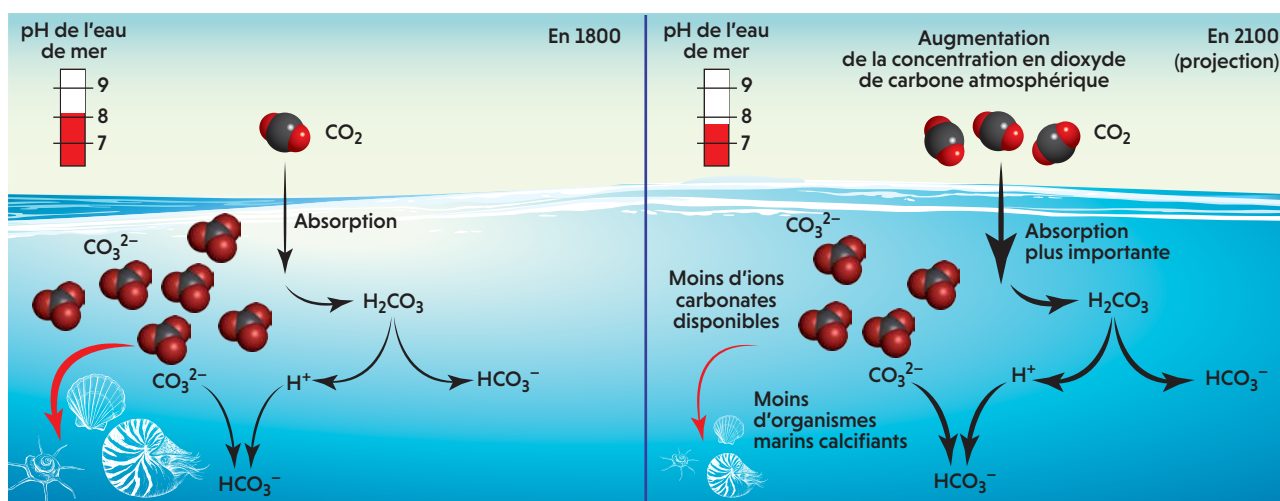
CO₂ ET ACIDIFICATION

L'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, en lien avec les activités humaines, cause l'augmentation des températures à la surface du globe. Et ce phénomène serait bien pire sans les océans, qui absorbent environ 30 % du CO₂ atmosphérique. Mais cette absorption n'est pas sans conséquence sur la chimie des océans. Lorsque le CO₂ se dissout, il réagit avec l'eau (H₂O), provoquant la formation d'acide carbonique (H₂CO₃), qui lui-même se dissocie en ions H⁺ et bicarbonate (HCO₃⁻). La concentration des ions H⁺ détermine l'acidité, mesurée par le pH sur une échelle allant de 1 (pH très acide) à 14 (pH très alcalin). Plus la concentration en ions H⁺ augmente, plus le pH diminue : les océans s'acidifient.

Les ions H⁺ en surplus réagissent avec les ions carbonate CO₃²⁻ présents dans l'océan pour former des ions HCO₃⁻, ce qui entraîne une baisse de la disponibilité des ions carbonate. Or ces ions, que l'on retrouve associés au calcium dans les minéraux de calcite et d'aragonite, sont indispensables à certains organismes pour la construction de leur coquille ou de leur squelette. Pendant 800 000 ans, le pH est resté stable autour de 8,2. Mais depuis la révolution industrielle au XIX^e siècle, il a chuté à 8,1. Cette diminution peut paraître insignifiante, mais elle correspond à une baisse de 30 % du pH (son échelle étant logarithmique). Or les scientifiques estiment que ce phénomène va s'accélérer et que le pH pourrait atteindre 7,8 d'ici à la fin du siècle.

HÉLÈNE GÉLOT, journaliste scientifique

ACIDIFICATION DES OcéANS



atteinte vers 2030 –, les poissons n'étaient plus aussi prudents: ils restaient plus de 50% de leur temps du côté de la source sonore.

Nous avons répété l'expérience à deux reprises, avec une eau 100% et 150% plus acide – soit les acidités attendues en 2050 et 2100, respectivement. Dans les deux situations, les poissons-clowns passaient environ 60% de leur temps près des haut-parleurs diffusant les bruits de récif de jour. Nous avons aussi réalisé des tests afin de vérifier qu'aucun n'avait perdu le sens de l'audition. Ainsi, exposés à une acidité élevée, les poissons-clowns devenaient incapables de comprendre la signification des stimuli auditifs.

Difficile, pour des animaux marins aux sens défaillants, d'échapper aux prédateurs. Mais qu'en est-il des prédateurs eux-mêmes? Les requins ont un odorat ultrasensitif, sur lequel ils s'appuient pour se diriger, trouver leur partenaire et traquer leurs proies. Auraient-ils plus de mal à chasser dans une eau plus acide? C'est la question que nous nous sommes posée à la suite de nos résultats sur les poissons-clowns. Nous

avons séparé 24 émissoles douces (de petits requins collectés près de Woods Hole, dans le Massachusetts, le long de la côte est des États-Unis) dans trois bassins différents. Le premier bassin contenait de l'eau de l'océan puisée près de Woods Hole, le deuxième et le troisième de l'eau plus concentrée en CO₂, ajustée aux prévisions pour 2050 et 2100, respectivement.

Cinq jours plus tard, nous avons placé les requins dans des citernes de 10 mètres de long et de 2 mètres de large, dont l'eau avait la même acidité que celle du bassin qu'ils occupaient les jours précédents. Aux deux extrémités de chaque citerne était projeté un panache d'eau. Pendant que les requins nageaient, nous avons remplacé l'un des panaches par du «jus de calmar», obtenu en récupérant de l'eau de mer dans laquelle nous avions mis à tremper des calmars, leur repas préféré.

Des caméras et des logiciels de suivi ont enregistré la suite des événements. Les requins du premier groupe (eau non traitée) et du deuxième nageaient 60% du temps du côté où l'odeur de calmar était injectée. Mais les ➤

REQUINS, BARS ET CREVETTES PISTOLETS

Clac clac clac clac... Sous l'eau, un véritable concerto: les crevettes pistolets se font entendre à des milliers de kilomètres. Pour défendre leur territoire, leurs larges pinces se referment si rapidement que l'expulsion d'eau qui en résulte entraîne la formation, par cavitation, d'une bulle d'air. En implosant, celle-ci produit un son de haute fréquence (supérieure à 570 hertz) et pouvant atteindre plus de 200 décibels. En 2016, une équipe australienne de l'université d'Adélaïde s'est intéressée à l'impact de l'acidification des océans sur ce comportement.

En laboratoire comme en conditions naturelles, Tullio Rossi et ses collègues ont montré que la fréquence et l'intensité des claquements diminuent fortement lorsque la concentration de CO_2 dans l'eau est plus importante. Pourtant, les caractéristiques physico-chimiques de leurs pinces n'ont pas été altérées: c'est bien leur comportement qui a été modifié. Selon ces chercheurs, cette diminution du volume sonore pourrait perturber les organismes marins qui se repèrent en grande partie grâce à ce type de sons. En effet, il a été montré par ailleurs que les larves des Pomacentridés (une famille de poissons comptant notamment les poissons-clowns et les poissons-demoiselles) localisent les récifs coralliens en utilisant préférentiellement les sons de haute fréquence (supérieure à 570 hertz), similaires à ceux produits par les crevettes pistolets.



Dans une eau plus acide, la crevette pistolet produit des bruits moins intenses et moins aigus. Or des larves utilisent ces bruits pour repérer leur habitat dans le récif corallien...

La même année, ces chercheurs se sont penchés sur un autre sujet: les effets conjoints de l'acidification des océans et de l'augmentation des températures sur le comportement de chasse des requins. Dans une eau à température plus élevée, les requins sont plus actifs dans leur quête de nourriture. Notamment, ils localisent leur proie plus rapidement et nagent de manière plus active. Mais lorsque les requins

sont également intéressés aux effets conjoints du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'augmentation de la température sur le comportement des poissons. L'équipe de recherche dirigée par José-Luis Zambonino, à Brest, élève des bars depuis plus de trois ans à trois concentrations de CO_2 et à deux températures différentes. Les chercheurs observent le comportement de ces poissons, évaluent leur performance de nage et mesurent leur activité en suivant leur consommation d'oxygène. Pour une même acidité, les bars sont plus réactifs lorsque la température est plus élevée. Mais plus la concentration de CO_2 est forte, et plus les poissons semblent anesthésiés. «Nos études sont toujours en cours, mais on suppose que le CO_2 aurait un effet sédatif sur les poissons», explique Guy Claireaux, chercheur au Laboratoire des sciences de l'environnement marin à l'université de Bretagne occidentale, professeur d'écophysiologie, d'écotoxicologie et d'énergétique des poissons et membre du projet. «Un peu à la manière d'une drogue ou de l'alcool sur le cerveau d'un humain, le CO_2 affecterait le système nerveux central des poissons. Si c'est le cas, cela expliquerait à la fois les comportements à risque et les interprétations confuses des stimuli olfactifs et auditifs observés sur plusieurs espèces de poissons par d'autres équipes.»

HÉLÈNE GÉLOT

Un peu à la manière d'une drogue ou de l'alcool sur le cerveau d'un humain, le CO_2 affecterait le système nerveux central des poissons

sont exposés à une eau à la fois plus chaude et plus acide, ces effets positifs sont annulés: l'eau plus acide perturbe l'interprétation des signaux olfactifs et visuels chez ces prédateurs, affectant leur capacité de chasse.

Dans le cadre d'une collaboration franco-allemande, des chercheurs de l'université de Bretagne occidentale et de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) se

> requins du troisième groupe évitaient soigneusement l'odeur de leur proie, passant moins de 15% du temps du côté diffusant le « jus de calmar ». En outre, les requins du premier groupe cognaient et mordaient de façon répétée une brique placée au-dessus du bec d'où sortait l'odeur de calmar. Et ce, deux fois plus souvent que ceux du deuxième groupe et trois fois plus que ceux du troisième.

C'est très surprenant de voir un prédateur se désintéresser de sa proie. Au sommet de la chaîne alimentaire, mais vulnérables aux changements environnementaux, les requins pourraient se retrouver très menacés par l'acidification des océans, de même que les écosystèmes où ils vivent.

DES POISSONS PLUS INTRÉPIDES

Il est toujours délicat d'affirmer que des comportements observés en laboratoire seraient identiques dans la nature. Nous nous sommes donc rendus dans un lagon sablonneux près d'une île australienne au nord de la Grande Barrière de corail pour examiner un autre caractère: la témérité. Là, nous avons testé comment des poissons-demoiselles juvéniles sauvages réagissaient à des odeurs de prédateurs après avoir été exposés à une eau acide pendant quatre jours. En laboratoire, parmi ces poissons, environ 50% de ceux qui avaient été exposés à une eau ajustée aux prévisions pour 2050 étaient attirés par l'odeur du prédateur; et tous ceux exposés à une eau encore plus acide (projections pour 2100) l'étaient aussi. Qu'en était-il en conditions naturelles?

Les poissons-demoiselles venant d'une eau plus acide s'aventureraient davantage hors du récif

Nous avons tatoué les poissons-demoiselles afin de les identifier et nous les avons ensuite relâchés sur un petit récif construit par nos soins dans le lagon. Ceux qui avaient été maintenus dans l'eau la plus acide présentaient un comportement à risque: au lieu de rester à proximité d'un corail, ils s'aventuraient hors du récif et ce, bien plus souvent que ceux qui étaient restés dans de l'eau non traitée. Et une fois de retour

au corail (effrayés par un plongeur), ceux qui avaient été exposés à l'eau la plus acide étaient aussi les plus prompts à ressortir de leur abri. De fait, la probabilité, pour les poissons les plus téméraires, d'être dévorés par un prédateur était neuf fois plus élevée que celle des poissons non exposés (et cinq fois plus élevée pour ceux qui avaient été exposés à l'acidité prévue en 2050).

Beaucoup de scientifiques utilisent les poissons récifaux comme objet d'étude, car leurs comportements sont connus et faciles à observer. Mais d'autres chercheurs se sont intéressés aux conséquences de l'acidification sur le comportement des invertébrés marins. Des effets ont ainsi été observés sur ces organismes, pas toujours négatifs. Ainsi, des biologistes de l'Institut de recherche de l'aquarium de Monterey Bay ont élevé des bernard-l'ermite dans des eaux plus acides. Ceux-ci ne se sont pas montrés plus intrépides que d'habitude. Au contraire, ils prenaient beaucoup plus de temps à réémerger de leur coquille quand ils étaient « attaqués » par un faux prédateur (une pieuvre en jouet).

Au Chili, Patricio Manríquez, de l'Institut de sciences marines et de limnologie, à Valdivia, et ses collègues ont travaillé avec des ormeaux, des mollusques qui s'accrochent aux rochers le long de rivages balayés par les vagues. Quand des vagues violentes détachent les ormeaux de leur support, ils se raccrochent rapidement pour ne pas se laisser emporter par les flots et devenir la proie de prédateurs. Le temps mis à se redresser dans une position permettant de se raccrocher est donc important pour leur survie. Lorsque les scientifiques ont retourné des ormeaux préalablement soumis à des concentrations plus fortes en CO₂, ceux-ci se redressaient plus rapidement qu'en conditions normales.

Ainsi, l'acidification des océans modifie le comportement des animaux marins et semble affecter plus particulièrement les poissons. Mais comment? Certains chercheurs se demandent si ce ne sont pas les stimuli eux-mêmes (les odeurs et les sons) qui sont altérés par l'acidité. Mais les expériences montrent que les poissons sont toujours en mesure d'identifier les stimuli chimiques dans une eau plus acide. D'autres scientifiques proposent que ces comportements étranges constituent une réponse au stress des poissons tentant de réguler leur acidité interne face à l'acidification de l'environnement, mais cette hypothèse requiert davantage d'investigations.

Suivant une intuition différente, Philip Munday, de l'université James-Cook, en Australie, et moi-même avons décidé de collaborer avec Göran Nilsson, de l'université d'Oslo. Son idée était que l'acidification interférait avec la fonction d'un neuro-inhibiteur appelé GABA. Cette molécule est connue pour moduler la transmission des messages nerveux dans le cerveau et le système nerveux de nombreux >

> animaux, dont les humains, en se liant à des canaux ioniques – les récepteurs GABA_A – nichés dans la membrane des neurones. En se fixant sur un tel récepteur, GABA ouvre le canal. Un flux d'ions chlorure pénètre alors dans le neurone, ce qui entraîne son hyperpolarisation et, par là, son inhibition.

Or quand des poissons sont exposés à une eau de mer plus riche en CO_2 , et donc plus acide, les concentrations d'ions dans le sang et les tissus s'ajustent pour maintenir l'acidité de l'organisme. Notamment, des ions bicarbonate s'accumulent dans l'organisme pour contrer l'acidification, échangés contre des ions chlorure *via* les branchies. Nous nous sommes donc demandé si le CO_2 ne perturbait pas le fonctionnement des récepteurs GABA_A . La modification de composition ionique qu'il produit dans le milieu intérieur des poissons change le gradient électrochimique de part et d'autre de la membrane des neurones; peut-être au point d'inverser les flux d'ions lors de l'ouverture des canaux par GABA? Dans ce cas, des ions chlorure sortiraient des neurones, ce qui les dépolariserait. En d'autres termes, au lieu d'inhiber l'activité neuronale, l'interaction de GABA et de son récepteur l'exciterait, entraînant des changements comportementaux...

Pour le vérifier, nous avons exposé des poissons à de fortes concentrations de CO_2 , puis les avons placés dans de l'eau contenant de la gabazine, une substance qui empêche le neuro-inhibiteur GABA de se lier à son récepteur et d'ouvrir le canal. Sans gabazine, les poissons se dirigeaient vers l'odeur de leur prédateur, mais après 30 minutes de traitement à la gabazine, ils ont retrouvé un comportement normal et ont fui l'odeur du prédateur. La fonction du récepteur GABA_A est donc bien perturbée par l'acidification. Néanmoins, sa sensibilité est très différente d'une espèce à l'autre. Il n'est donc pas certain que ce mécanisme soit la cause première des changements comportementaux observés.

LES POISSONS S'ADAPTERONT-ILS?

La question que l'on me pose le plus souvent quand je parle de l'acidification des océans est la suivante: la vie marine peut-elle s'adapter? La capacité de résilience de la nature est stupéfiante. Prévoir si un organisme sera en mesure de s'adapter est déjà difficile, mais anticiper comment des écosystèmes complexes évolueront à la suite de l'acidification des océans est actuellement impossible.

La principale limite des expériences est la vitesse de l'acidification. Dans la plupart des études, les poissons sont élevés ou exposés à des concentrations élevées de CO_2 pendant quelques jours ou quelques mois: une échelle de temps extrêmement courte. Les animaux n'ont pas réellement l'occasion de s'acclimater (à

l'échelle d'un individu) ou de s'adapter (sur plusieurs générations, par le biais de l'évolution). L'idéal serait d'étudier les organismes marins dans leur milieu, sur des durées plus longues, et au fur et à mesure que l'océan s'acidifie.

Afin d'avoir un aperçu de ces conditions, les scientifiques observent des récifs situés près de volcans, où des gaz, dont du CO_2 , s'échappent



La progéniture de poissons récifaux élevée dans une eau plus acide ne s'adaptait pas mieux



du sol. L'eau à ces endroits est donc naturellement aussi acide que le prévoient les scientifiques pour 2100. Lors de nos visites dans de tels récifs en Papouasie-Nouvelle-Guinée, nous avons noté que les poissons-demoiselles juvéniles étaient attirés par l'odeur du prédateur, ne savaient pas distinguer entre des odeurs de prédateurs et de non-prédateurs, et faisaient preuve d'un comportement risqué, comme nos poissons en laboratoire. Sur des récifs classiques, des poissons-demoiselles des mêmes espèces détectaient et évitaient les prédateurs, et étaient plus prudents.

Nous ne savons pas non plus si les comportements observés peuvent être transmis aux générations futures, et les recherches dans ce domaine n'en sont qu'au tout début. Dans une étude, la progéniture de poissons de récifs coralliens élevés sous de fortes concentrations de CO_2 ne montrait aucune capacité d'adaptation supplémentaire.

L'acidification des océans est un facteur de stress parmi d'autres. Surpêche, augmentation de la température de l'eau, pollution, disparition progressive des grands prédateurs, destruction des habitats... les menaces qui planent sur les habitants des océans sont nombreuses. Certaines pratiques locales, comme la coupe des nageoires des requins, peuvent être endiguées ou au moins limitées *via* des réglementations. Ce n'est pas le cas des atteintes telles que l'augmentation de la température et l'acidification des océans, dont les effets pourraient constituer, pour de nombreuses espèces, la goutte d'eau qui fait déborder le vase. ■

BIBLIOGRAPHIE

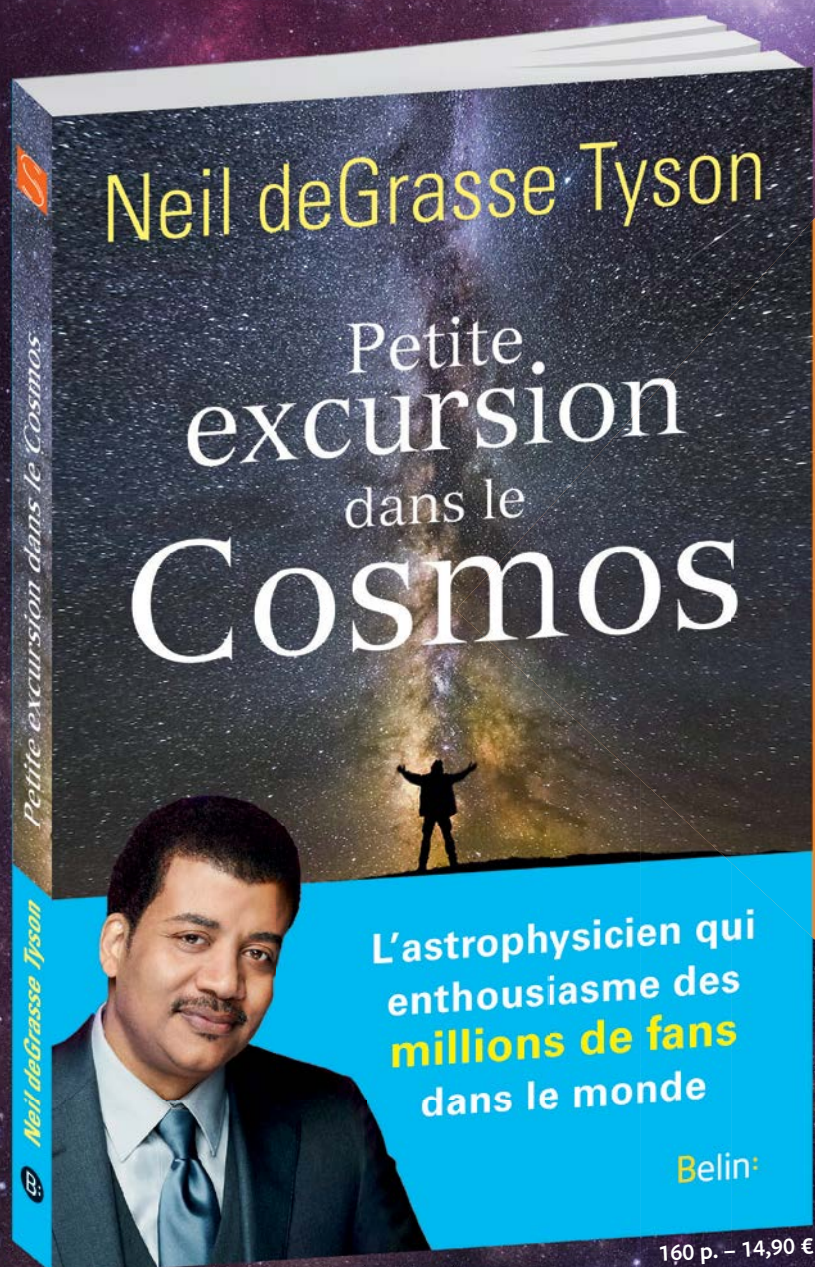
D. L. Dixson et al., **Odor tracking in sharks is reduced under future ocean acidification conditions**, *Global Change Biology*, vol. 21(4), pp. 1454-1462, 2015.

P. L. Munday et al., **Behavioural impairment in reef fishes caused by ocean acidification at CO_2 seeps**, *Nature Climate Change*, vol. 4, pp. 487-492, 2014.

G. E. Nilsson et al., **Near-future carbon dioxide levels alter fish behaviour by interfering with neurotransmitter function**, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 201-204, 2012.

T. Rossi et al., **Silent oceans : Ocean acidification impoverishes natural soundscapes by altering sound production of the world's noisiest marine invertebrate**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 283, 20150346, 2016.

Explorez les mystères de l'univers avec la star de l'astrophysique !



Quelle est l'histoire de l'univers?
Quelles sont les lois physiques
et les forces qui gouvernent
la matière? Qu'y a-t-il entre les
galaxies? Et entre les planètes?
Que sait-on sur la mystérieuse
matière noire et l'étrange énergie
sombre? Et d'où viennent les
éléments qui nous constituent tous?

Avec la verve, l'humour et l'esprit
qui le caractérisent, Neil deGrasse
Tyson, en digne héritier de Carl
Sagan, rend accessible à tous
les principes les plus compliqués
de l'astrophysique. Une invitation
irrésistible à lever la tête pour
admirer l'immensité de l'univers.

Dans la collection

SCIENCE
À PLUMES

Belin:
ÉDITEUR

belin-editeur.com • [f](https://www.facebook.com/EditionsBelin)/EditionsBelin • [@editions_belin](https://twitter.com/editions_belin)

160 p. – 14,90 €