

# Actes

Mars 2019



## Colloque Acidification des océans : conséquences sur les écosystèmes et les activités humaines

**Qu'est-ce que l'acidification des océans ? Quelles en seront les conséquences potentielles sur les activités économiques ? Comment réagir ?** Telles sont les questions qui ont été abordées lors de cette journée qui a rassemblé scientifiques, acteurs professionnels et associations.

Organisé par la FRB et le MTES en partenariat avec l'Ifremer, ce colloque s'appuie sur les expériences de terrain et sur les résultats des projets scientifiques financés par le ministère de l'écologie dans le cadre du programme de recherche "Acidification des océans".

---

## Préface

---

**Laurent Bergeot**  
**Chef du service de la Recherche**  
**Commissariat général au développement durable du MTES**

Après avoir remercié l'Ifremer et la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) pour l'organisation du colloque et les participants d'être si nombreux, Laurent Bergeot, chef du service de la Recherche au Ministère chargé de la transition écologique et solidaire (MTES), introduit la journée en rappelant que c'est **le 5<sup>e</sup> rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) de 2013 qui a mis en évidence l'acidification des océans depuis la période pré-industrielle.**

Cette question est particulièrement importante pour **la France qui possède la seconde zone économique maritime exclusive avec plus de 11 millions de km<sup>2</sup>.** Le patrimoine naturel des territoires ultra-marins est unique, tant par sa richesse que par sa diversité. Ceux-ci représentent en particulier environ 20 % des atolls et 10 % de la totalité des récifs de la planète sur un linéaire de plus de 5 000 km.

En octobre 2014, Madame Ségolène Royal, alors ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, annonce le lancement d'un appel à projets de recherche sur l'acidification des océans et ses conséquences. La direction de la recherche et de l'innovation du Commissariat général au développement durable du MTES, avec l'appui de la FRB et de la direction de l'eau et de la biodiversité du MTES, a alors constitué un conseil scientifique. Ce dernier a rédigé un appel à propositions de recherches pour mobiliser la communauté scientifique sur les connaissances disponibles et pour réfléchir aux besoins de recherche en appui à l'action publique. Après une procédure de sélection, **huit projets portant sur différentes thématiques ont été retenus, et financés à hauteur de 90 k€ chacun.** Ces projets ont démarré au cours du dernier trimestre 2017 pour une durée de 3 ans.

Le comité d'orientation a constaté, en mai 2018, que ce programme et les projets financés étaient de qualité, tant en termes de diagnostic que de prospective. Il a donc souhaité aller plus loin dans l'appui aux politiques publiques et que les résultats soient transférables – compréhensibles – utilisables par les acteurs dès leur parution faisant partie des critères d'évaluation et de sélection des projets. **C'est ainsi que ce colloque de mi-parcours implique, en plus des scientifiques, des acteurs professionnels, des associations et des représentants des pouvoirs publics.**

**Hélène Soubelet**  
**Directrice de la FRB**

L'océan est un écosystème où les enjeux sont majeurs, complexes et interdisciplinaires. Ce programme illustre le regroupement des expertises scientifiques autour du thème des effets anthropiques sur le climat et sur la biodiversité. À la FRB, le rapprochement des communautés scientifiques concernées a débuté en 2014 sous la devise « Biodiversité et climat, même combat ». À cette époque, la question de l'acidification était déjà centrale, notamment au sein du Giec et de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (Ipbes, *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*). Depuis, quatre évaluations régionales de l'Ipbes ont été publiées et aucune ne traite de l'acidification des océans. Le constat est peu glorieux : le terme n'est cité que trois fois sur un résumé pour décideurs d'une trentaine de pages. Seuls quelques mots sur le mécanisme de l'acidification et son importance sont

mentionnés, et uniquement les impacts sur les récifs coralliens sont présentés. Ainsi, si le thème de l'acidification des océans est bien connu dans le milieu de la recherche, les messages transférés aux décideurs sont trop peu nombreux pour qu'ils soient pris en compte. Dans ce contexte, **ce genre de programme, qui permet de financer de la recherche thématique, permet également de structurer la recherche, dans le but d'aider les décideurs face aux enjeux sociétaux qui s'annoncent.**

---

### Conférences introductives

---

Modérateur :

*Guy Claireaux - Université de Bretagne Occidentale - Membre du Comité scientifique du programme Acidification des océans*

**Jean-Pierre Gattuso**

**CNRS – Sorbonne Université – Iddri**

**Président du Comité scientifique du programme Acidification des océans**

Le capital représenté par les océans est considérable : l'actif net a été estimé à 24 000 milliards US\$. Le retour annuel de ce capital (le produit océanique brut) est de 10 %. Or, la majeure partie (70 %) des services écosystémiques, comme la production de biomasse captée par l'homme, l'absorption du gaz carbonique, les services récréatifs, sont basés sur un océan en bonne santé.

#### Importance de l'océan pour l'humanité.

Sur la décennie 2008-2017, le bilan global du gaz carbonique est le suivant : une absorption par l'atmosphère pour 43 %, par la végétation pour 29 % et par l'océan pour environ 25 %. **L'océan modère donc le changement climatique** en absorbant 93 % de l'excès de chaleur et le quart des émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui conduit au réchauffement, à l'acidification et à l'élévation du niveau des océans.

#### Qu'est-ce que l'acidification des océans et quel est son impact ?

Le CO<sub>2</sub> est le gaz carbonique qui, une fois dissous dans l'eau, se transforme en acide carbonique ; il induit une augmentation de l'acidité de l'eau de mer (diminution du pH). Ainsi, après seulement 9 ans d'observation en Méditerranée nord-occidentale, on peut déjà observer une diminution significative du pH malgré de fortes variations saisonnières. **L'acidification des océans a de nombreux impacts négatifs entraînant par exemple la diminution de la calcification des coraux, des coccolithophores ou l'altération ou la disparition de certaines espèces calcaires (mollusques) en raison d'une eau de mer devenue corrosive vis-à-vis du carbonate de calcium.**

**L'acidification n'agit pas de manière isolée.** Ses effets se conjuguent à ceux du réchauffement, de la désoxygénation et de l'élévation du niveau de la mer. Prédire l'état futur de l'océan requiert donc de s'intéresser à ces facteurs multiples. Pourtant, même si l'objectif de l'Accord de Paris de limiter les émissions de gaz à effet de serre de manière à limiter le réchauffement global à 2°C par rapport à la période pré-industrielle est respecté, les récifs coralliens sont sans aucun doute l'écosystème marin le plus menacé. Les bivalves et leur aquaculture sont également fortement menacés. Or, les dernières statistiques d'émissions de CO<sub>2</sub> sont peu rassurantes. On a observé une stabilisation des émissions en 2013-2014, mais une reprise d'émissions élevées est intervenue à partir de 2018. À l'heure actuelle, on se dirige vers le scénario catastrophique en termes d'impacts.

**Laurent Bopp : Projet Acidoscope**

**CNRS-IPSL-ENS**

**Porteur du projet Acidification de l'océan : projections, régionalisation et cartographie (Acidoscope), un des huit projets financés dans le cadre du programme Acidification des océans**

La recherche fondamentale tente de comprendre le mécanisme de l'acidification et ses impacts en cours sur lesquels il existe encore beaucoup d'incertitudes. Selon le rapport du Giec, et le scénario "*Business As Usual*", les projections d'acidification sont spatialement robustes, homogènes et sûres. L'acidification de l'océan dépend au premier abord des émissions de CO<sub>2</sub>. Ces émissions entraînent un bouleversement de la chimie de l'eau de mer. Régler le problème du changement climatique permettrait de régler en partie le problème de l'impact de l'acidification des océans. Les estimations prévoient une baisse de 0,3 unités de pH d'ici à 2100. **La recherche tente de comprendre comment certains organismes ou systèmes vont réagir à ces évolutions / changements de pH dans les années et décennies à venir.** Il faut tout d'abord noter la grande variabilité temporelle et spatiale de l'évolution du pH au niveau global : une évolution temporelle du pH avec une baisse marquée en réponse à l'augmentation des teneurs de CO<sub>2</sub> atmosphériques, mais également une très forte variabilité saisonnière et des variations décennales naturelles. Pour mieux s'adapter, il faudra également et avant tout prendre en compte la variabilité à l'échelle locale. D'autres facteurs pourraient amplifier l'acidification tels que les dépôts atmosphériques de certains polluants ou encore les apports fluviaux de nutriments. **Le projet Acidoscope a entre autres pour objectif de développer un outil de visualisation des scénarios d'acidification des océans.** Ceci facilitera l'accès aux différents scénarios issus des rapports du Giec. Toutes les variables du système carbonate (par ex. : le pH, le niveau de saturation des eaux par rapport à la calcite et à l'aragonite) seront accessibles. Cet outil se présentera sous la forme d'un site web accessible à tous et permettra d'avoir une idée à l'échelle locale de l'acidification. L'utilisateur sera ainsi en mesure de sélectionner la variable d'intérêt et d'obtenir les moyennes et niveaux d'incertitude correspondant à ces modèles. Il aura également la possibilité de télécharger les données et de recréer les séries temporelles. Le **projet Acidoscope** peut ainsi faire le lien avec les autres projets.

**Les premiers grands résultats du projet Acidoscope ont pu établir que l'évolution de la saisonnalité des variables entrainait en jeu dans le système carbonate.** Au cours du cycle saisonnier, on remarque une amplification de la concentration en ion hydrogène (H<sup>+</sup>). Cette amplification est particulièrement prononcée en zone côtière et à proximité des fonds en raison des apports de nutriments par les fleuves. Ces apports conduisent à une augmentation de la production biologique, de la respiration et donc à une exacerbation de l'acidification. **L'Arctique est la première grande région océanique où l'on pourra mettre en évidence une sous-saturation de l'aragonite<sup>1</sup> dans les eaux de fonds.** En effet, l'importance de la circulation océanique dans l'acidification de l'océan Arctique, avec les apports latéraux de carbone par l'Atlantique, a récemment été mise en évidence. Il y a donc nécessité de mieux comprendre l'échelle régionale pour mieux prévoir les évolutions. L'outil développé permettra de calculer l'évolution du pH et des variables associées en lien avec les futurs scénarios du Giec.

1 L'aragonite est un minéral composé de carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>.

**Marion Gehlen**

**Directrice de recherche CEA-IPSL-LSCE**

**Membre du Comité scientifique du programme Acidification des océans**

### **Le suivi du pH et l'indicateur de l'ODD 14**

*L'ODD 14 – Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable et de la gestion soutenable de l'écosystème marin*

**Une réduction maximale de l'acidification des océans et la lutte contre ses effets délétères font partie des cibles de l'ODD 14.** La modélisation numérique permet de retracer l'évolution du pH de l'océan de surface depuis le début de l'ère industrielle, et son évolution future selon différents scénarios d'émission de CO<sub>2</sub> (cf. Acidoscope). En parallèle, le suivi du pH sur des sites marins représentatifs ont été mis en place. Des approches d'apprentissage machine permettent de tirer parti de ces observations ponctuelles dans le temps et dans l'espace pour produire des cartes avec une fréquence mensuelle de la distribution spatiale du pH de l'océan de surface. Le pH est dérivé d'une combinaison de mesures de la pression partielle de CO<sub>2</sub>, de l'alcalinité, de la température, de la salinité, des silicates et des phosphates. Les cartes globales spatialisées de pH ainsi obtenues sont basées uniquement sur des observations. Elles permettent d'évaluer les simulations numériques et constituent un élément précieux pour la gestion environnementale. Les moyennes annuelles permettent le suivi de l'évolution du pH entre 2001 et 2016. La tendance est à la baisse avec une diminution annuelle de 0.0017 unité de pH. L'indicateur a été développé dans le cadre du programme *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*. Il est prolongé annuellement et les données peuvent être téléchargées par le [portail Copernicus](#).

### **Discussion avec les participants**

#### ***L'impact côtier de l'acidification des océans ne couvre pas encore la région bretonne.***

Les données utilisées sont issues des modèles globaux du Giec et ne couvrent pas encore les régions Bretagne et Méditerranée. La résolution spatiale de ces modèles ne permet pas de représenter la zone côtière et il subsiste de nombreuses incertitudes. La modélisation des zones côtières est particulièrement difficile en raison de leur hétérogénéité et de leur complexité (apports en nutriments des fleuves, réchauffement rapide des eaux, activités économiques) et il n'y a pas toujours des systèmes d'observation en place. Il y a cependant une forte volonté de descendre sur ces échelles locales. Il semble par ailleurs qu'il y ait un couplage fort entre la désoxygénation des masses d'eau et la diminution de leur pH.

#### ***Sait-on pourquoi il y a une forte variation de pH en fonction de la latitude (plus forte dissolution dans les eaux froides) ? Quel est le rôle de la profondeur ?***

Les eaux froides absorbent plus de CO<sub>2</sub> que les eaux chaudes. Le CO<sub>2</sub> anthropique pénètre par la surface puis il se propage progressivement en profondeur par le mélange des masses d'eau. Les eaux de subsurface ont un pH naturellement plus faible en raison de la décomposition de la matière organique (qui consomme l'oxygène et produit du CO<sub>2</sub>).

#### ***Au niveau européen, des millions d'euros sont dépensés dans des programmes de monitoring, mais aucune base de données n'est facilement accessible. Pourquoi ne pas mettre l'argent (Horizon Europe) sur des indicateurs utilisables par les décideurs et acteurs de terrain ?***

Il existe des programmes de suivi et d'accès aux données. Par exemple, le réseau Somlit qui est très sous-financé, quelques milliers d'euros par an pour le suivi du pH dans la rade de Villefranche-sur-mer. Il existe d'autres programmes : Lico et l'Infrastructure de recherche Système Terre. Grâce à des colloques comme celui-

ci, on peut voir qu'il y a encore des progrès à faire entre ce qui est fait, ce qui est connu et ce qu'il est nécessaire de faire afin de répondre aux besoins des usagers. Dans le cadre de la Directive cadre "Stratégie pour le milieu marin" (DCSMM), 80 personnes viennent de réaliser des évaluations scientifiques. Les programmes de surveillance sont construits avec les acteurs locaux qui sont très impliqués. Il y a une montée en compétences concernant les analyses de ce genre de travail, notamment sur des cheptels conchylicoles et des suivis hydrologiques, dont le pH (on constate d'ailleurs des variations importantes du pH au niveau local). Ces réseaux locaux de collecte de données sont mis en place avec Ifremer, mais sont peu visibles malgré leurs apports (il existe actuellement un jeu de données comprenant 19 années de récolte de données).

### ***Les modèles peuvent-ils prédire les impacts de l'acidification des océans sur les micro-algues ?***

De nombreux modèles intègrent des descriptions simplifiées des écosystèmes marins, mais il y a un manque de données pour paramétrer les réponses du vivant aux impacts du pH.

### ***Quels sont les impacts du pH sur les deux stades larvaires et sur la croissance de l'huître ? Comment manager nos entreprises en conséquence ?***

Les questions sont pertinentes et justifient à elles seules l'existence de ce programme de recherche "Acidification des océans". C'est également ce à quoi tentent de répondre - partiellement - les projets de recherche financés dans ce cadre, notamment le projet AiAiAi évoqué dans la suite du colloque.

---

## **Table ronde 1 : Aurons-nous encore des poissons et fruits de mer à Noël ?**

---

Modérateurs :

*Philippe Gros (membre du Conseil scientifique de la FRB)*

*Denis Bailly (Université de Bretagne Occidentale)*

*Tous deux membres du Comité scientifique du programme Acidification des océans*

### **Restitution flash de quatre projets du programme « Acidification des océans »**

#### **Acidification, adaptation, acclimatation des mollusques marins (AiAiAi) Fabrice Pernet (Ifremer-Lemar)**

L'objectif initial du projet **AiAiAi** est l'étude de deux espèces commerciales d'intérêt écologique et économique : l'huître creuse et l'huître perlière.

**Qu'en est-il des capacités d'acclimatation des huîtres à l'acidification, en interaction avec la température ?** Le projet **AiAiAi** a consisté en l'élevage de plusieurs générations d'huîtres dans des conditions différentes d'acidification. La première manipulation a été effectuée en 2018 chez les huîtres creuses et leur progéniture. Deux scénarios ont ainsi été testés : un scénario témoin et un scénario de réchauffement climatique et des températures à l'horizon 2100. Au bout de six mois de manipulation, aucun effet significatif n'a été détecté sur différents paramètres phénotypiques simples. L'équipe projet s'est donc questionnée sur l'étude du bon scénario.

L'équipe est repartie à zéro et a tenté une manipulation d'analyse de point de bascule (*tipping point*). Quel est le seuil de pH à partir duquel la réponse physiologique de l'huître est impactée ? Les huîtres ont été exposées à 15 pH différents compris entre 7,8 et 6,4. Des photos ont été réalisées après un mois

d'acclimatation et des trajectoires de croissance extrêmement contrastées ont pu être observées en fonction du pH auquel elles ont été exposées. La croissance est non altérée entre 7,8 et 7,25. **En-deçà de 7,25, en revanche, la croissance est altérée avec amaigrissement et dissolution de la coquille.** On observe un point de bascule pour ces pH inférieurs à 7,25 après 14 jours d'acclimatation seulement.

À la fin de la manipulation, les huîtres ont été exposées à un virus potentiellement léthal mais aucune différence de mortalité n'a été observée entre les traitements expérimentaux (pH). Il semble donc que l'huître soit un animal plutôt résistant. Mais pourquoi ? **Le naissain d'huître creuse semble tolérer des conditions très acides, conditions observées dans l'environnement naturel de l'huître.**

### **Impact du changement océanique sur la biologie des organismes calcifiants : le cas de l'ormeau européen *Haliotis tuberculata*, une espèce d'intérêt économique (IcoBio)**

**Stéphanie Auzoux-Bordenave (UPMC-Borea)**

L'ormeau est un mollusque d'intérêt économique et écologique présentant une large répartition spatiale. L'ormeau européen est une espèce patrimoniale en Bretagne et elle fait l'objet d'une aquaculture basée principalement en Finistère Nord. Cette activité aquacole assure une production de naissain, puis de juvéniles destinés à la restauration.

Comme de nombreux organismes littoraux, cette espèce est sujette à des variations du milieu, notamment de température et de pH. De plus, la coquille de l'ormeau est constituée entièrement d'aragonite, une forme de carbonate de calcium particulièrement sensible à l'acidification. Quelles sont les réponses morphologiques, physiologiques et comportementales de l'ormeau à l'acidification océanique ?

Le projet IcoBio évalue les capacités d'acclimatation et d'adaptation de ces animaux aux variations du pH grâce à une approche multi-paramètres et transgénérationnelle. Les adultes ont été exposés à deux conditions de pH (ambiant 8,0 et futur 7,7) pendant cinq mois jusqu'à la reproduction (génération F1). Les croisements et la production des larves ont été effectués dans les mêmes conditions de pH. Le suivi des larves, des post-larves et des juvéniles s'est poursuivi durant six mois afin d'évaluer la réponse de la descendance issue de parents déjà exposés à l'acidification.

**Les résultats montrent que la croissance, le métabolisme global et le comportement des ormeaux adultes ne sont pas affectés par la réduction du pH. En revanche, une diminution du pH interne de l'hémolymphe et des modifications significatives de la structure coquillière ont été observées à pH 7,7.** Les analyses de la coquille ont montré une érosion du périostacum<sup>2</sup> et une dégradation des tablettes d'aragonite de la couche nacrée. Par ailleurs, des analyses de biomécanique ont révélé une réduction de la force de fracture chez les coquilles d'ormeaux soumises au pH faible, ce qui traduit une fragilisation de la coquille.

Concernant la génération F1, des anomalies de développement et une réduction significative de la calcification ont été observées chez les larves véligères<sup>3</sup>. De même, une augmentation significative de la mortalité des post-larves a été mesurée entre le stade métamorphique (neuf jours) et le stade deux mois et demi. En revanche, la fixation des larves et la viabilité des juvéniles au-delà de deux mois et demi ne semblent pas affectées par la diminution du pH. **Ces résultats suggèrent que des**

2 Le périostacum est la fine enveloppe qui constitue la partie la plus externe de la coquille des mollusques et des brachiopodes, entre autres. On le trouve aussi bien chez des espèces terrestres, marines ou dulçaquicoles. Le périostacum fait partie intégrante de la coquille. Il se forme en même temps que les autres couches de la coquille.

3 La larve véligère correspond à un stade larvaire des mollusques issu de la larve trochophore.

mécanismes transgénérationnels pourraient moduler les effets de l'acidification des océans sur la génération F1, comme cela a été montré chez d'autres espèces de mollusques.

En conclusion, l'acidification des océans induit des effets négatifs sur le développement larvaire et la biominéralisation des ormeaux, ce qui pourrait nuire au recrutement et accélérer le déclin des populations sauvages déjà fragilisées. En outre, la diminution de l'intégrité structurale et de la résistance mécanique de la coquille pourrait réduire la capacité de protection des ormeaux contre les prédateurs et les rendre plus vulnérables aux facteurs de stress (acidification des océans, réchauffement, pathogènes, etc.).

### **Mercury and carbon dioxide impact on the physiology and behavior of early-life stages of cuttlefish (Mercy) - Bioaccumulation du mercure chez les seiches et impact sur la physiologie et leur comportement**

**Thomas Lacoue-Labarthe (CNRS-Université de la Rochelle)**

La seiche comme céphalopode présente plusieurs intérêts : elle est un chaînon central des réseaux trophiques, vecteur de contaminants tels que le mercure (Hg) qui se concentre le long des chaînes trophiques. De plus, elle présente une physiologie remarquable et un comportement complexe pour un mollusque.

Le projet vise à comprendre comment l'hypercapnie<sup>4</sup> va modifier l'accumulation du mercure (Hg) chez la seiche et comment ces deux contaminants (i.e. CO<sub>2</sub> et Hg) neurotoxiques peuvent impacter la physiologie et le comportement de ces organismes. Le projet s'intéresse aux effets chez les individus et basé sur une approche expérimentale.

Le projet se focalise principalement sur les jeunes stades de vie et notamment sur le stade juvénile où plusieurs processus comportementaux se mettent en place. Basés sur l'utilisation des isotopes du Hg (radioactif et stable), la bioaccumulation du Hg inorganique (iHg) dissous, du méthylmercure (MeHg) par voie trophique, et le métabolisme du Hg (méthylation, déméthylation *in vivo*) sont étudiés à différents niveaux de pression partielle de gaz carbonique (pCO<sub>2</sub>). **Si une légère augmentation des concentrations de Hg dans les tissus d'embryons a pu être constatée, aucun effet de la pression partielle en CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) n'a pu être mis en évidence sur les paramètres cinétiques de bioaccumulation du Hg chez les juvéniles.**

Les effets du CO<sub>2</sub>, du Hg et des deux facteurs combinés seront investigués sur les performances physiologiques (e.g. respiration, métabolites, etc.) et comportementales (prédation, camouflage, réponses anti-prédation, etc.) des juvéniles.

### **Réponses physiologiques et adaptatives des poissons à l'acidification des océans (Pacio)**

**Guy Claireaux (Université de Bretagne Occidentale)**

Le projet Pacio étudie l'effet de l'acidification des océans sur les poissons et plus particulièrement sur le bar (*Dicentrarchus labrax*). Pour cela, l'équipe dispose de poissons élevés depuis le stade œuf dans une eau enrichie en CO<sub>2</sub>. Cette situation conduit à une baisse de la capacité des animaux à éliminer le CO<sub>2</sub> via la respiration et elle s'accompagne d'une baisse du pH de leur milieu intérieur. Afin de compenser cette acidification interne, les poissons procèdent à des ajustements, qui vont leur permettre de compenser ce déséquilibre de la balance acide-base, mais qui vont également conduire à des modifications profondes de la chimie de leur milieu intérieur.

<sup>4</sup> L'hypercapnie ou l'hypercarbie est un phénomène qui survient lorsque la pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) devient trop importante

La question pour les chercheurs est donc de **savoir si ces modifications sont susceptibles d'affecter le fonctionnement et les performances des poissons**. Les premiers résultats indiquent une meilleure minéralisation des os en eau enrichie en CO<sub>2</sub> (hypercapnique), ce renforcement du squelette s'accompagnant d'une diminution significative du taux de malformations chez les larves. La dynamique de l'acidification de l'estomac durant la digestion a également été scrutée, mais aucun effet significatif de l'hypercapnie n'a été observé. En revanche, un décalage d'environ un mois de la reproduction a été relevé chez les animaux élevés en condition enrichie en CO<sub>2</sub>. **Les performances de nage, qu'elle soit aérobie (endurance) ou anaérobie (réponse de fuite) ne semblent pas affectées par la teneur de l'eau en CO<sub>2</sub>. Par ailleurs, les conditions d'élevage n'ont eu aucun effet sur la croissance et la forme des otolithes.**

En ce qui concerne le comportement, deux résultats sont à retenir. Des mesures de taux métabolique ont tout d'abord mis en lumière **une différence dans le niveau de vigilance des animaux**, ceux élevés en milieu hypercapnique montrant une baisse de leur niveau d'attention aux perturbations extérieures. Dans un deuxième temps, l'analyse d'enregistrements vidéo du comportement de groupes de bars dans une enceinte expérimentale a permis de mettre en évidence **une diminution de la cohésion des groupes de poissons en eau hypercapnique, ces animaux montrant une plus grande indépendance vis-à-vis de leurs congénères.**

**Un mot des acteurs** - *Professionnels et associations : quels constats ? Quelles problématiques de terrain ? Quelles réponses apportées ?*

**Philippe Glize : SMIDAP**

**Conseiller aquacole régional – Syndicat mixte pour le développement de l'aquaculture et de la pêche en Pays de la Loire**

Suivi de la qualité de l'eau de mer du polder conchylicole de Bouin (Vendée) : impacts du pH

Le Syndicat mixte pour le développement de l'aquaculture et de la pêche (SMIDAP) a assuré le suivi de la qualité de l'eau du polder conchylicole de Bouin (Vendée) entre 2013 et 2015, et a étudié l'impact du pH sur les coquillages en élevage. Le polder est une zone conchylicole très importante qui compte environ 80 établissements, soit 30 % des entreprises conchylicoles des Pays de la Loire et 50 % des éclosiers de coquillages françaises. Le SMIDAP est particulièrement vigilant à de potentielles phases de mortalité en éclosier et nurserie. C'est pourquoi il a assuré en parallèle un suivi des différents paramètres physico-chimiques de l'eau à la demande du syndicat des éclosiers et nurseurs de coquillages (SENC). La prise des mesures se faisait de manière journalière lors du remplissage du polder. Parmi les paramètres étudiés, le suivi de l'évolution du pH a permis de constater des épisodes de baisse relativement significative au niveau local. **La baisse brutale du pH induit un ralentissement de croissance et/ou blocage de croissance, voire des phénomènes de mortalité. Le SMIDAP a pu constater que le seuil de déclenchement est un pH inférieur à 7,7.** La mortalité est alors d'autant plus marquée que le naissain est petit. Par ailleurs, une corrélation a été mise en évidence entre les chutes de pH et les conditions météorologiques. Le pH constitue donc un indicateur majeur pour la quantification de la qualité de l'eau de mer.

**Jean-Yves Le Goff**

**Président du Comité régional de la conchyliculture (CRC) Pays de la Loire**

Le Comité régional de la conchyliculture (CRC) des Pays de la Loire effectue des analyses journalières du pH dans le même polder et on constate des pics atypiques, mais fréquents, qui ne sont pas pour autant corrélés à des événements environnementaux. L'été, les variations de pH et de températures sont très

importantes. Cela va jusqu'à  $\pm 15$  degrés. Le CRC n'a pas constaté d'impacts du pH seul, mais davantage des impacts corrélés avec d'autres paramètres, dont notamment la température. **En 10 ans, le CRC a connu trois crises majeures de mortalités du fait du virus OsHV1 et du Vibrio aestuarianus sur les huîtres, des mortalités encore inexpliquées, mais très importantes sur les moules, et localement il arrive que le pH chute à 7,8.** C'est un dérèglement général qui est constaté.

**Benoit Salaun**

**Conseiller au Comité Régional de la Conchyliculture (CRC) - Bretagne Nord**

Les constats ne sont pas réjouissants. La situation n'est pour le moment pas inquiétante, mais n'est pas rassurante non plus. Quel est l'impact de l'acidification sur les pathogènes et leur prolifération ?

**Jérôme Lafon**

**Délégué filière Pêche et aquaculture – FranceAgriMer**

L'acidification des océans est un sujet dont il faut se saisir et il est nécessaire de se rapprocher des professionnels et des filières de l'aquaculture et de la pêche pour comprendre et constater les effets / impacts de l'acidification sur ces activités.

On constate par exemple des déplacements des populations et des stocks halieutiques en lien avec les évolutions climatiques. L'acidification des océans pourrait favoriser le développement de certains stocks au détriment d'autres. C'est une question à creuser afin de montrer la réalité des enjeux. FranceAgriMer apporte des financements, via le Fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche (FEAMP), pour l'innovation en aquaculture, portant par exemple sur l'amélioration de la sélection aquacole et des techniques de production. Mais de nombreuses questions se posent. Faut-il déplacer les productions plus au large ? Comment y accéder ? À ce jour, **les professionnels sont confrontés à des limitations techniques et financières.** Il y a également **un travail sur la diversification des espèces à élever**, et c'est tout **un modèle à repenser** face aux enjeux qui se posent actuellement. Il y a, en tout état de cause, nécessité à **faciliter les liens entre scientifiques et professionnels** et à **pérenniser le financement de la recherche sur le sujet.**

---

## **Table ronde 2 : L'impact de l'acidification des océans sur les écosystèmes. Quelles solutions ?**

---

Modératrices :

*Aline Tribollet (IRD-LOCEAN)*

*Claire Rollion-Bard (IPGP)*

*Toutes deux membres du Comité scientifique du programme Acidification des océans*

Restitution flash de trois projets du programme "Acidification des océans"

**Impact écosystémique : Les cyanobactéries, séquestrateurs de CO<sub>2</sub> et producteurs des "keystone" molécules qui structurent des écosystèmes (Ecosystem)**

**Suzanne Mills (Université de Perpignan - Criobe)**

Les récifs coralliens, écosystèmes parmi les plus diversifiés de la planète, sont très sensibles au changement climatique, à l'acidification des océans et à l'augmentation de la température. Ces trois phénomènes ont été identifiés comme les menaces les

plus importantes pour ces écosystèmes. **Avec les prévisions de températures et de pH établies pour 2100 par le Giec, les cyanobactéries apparaîtraient comme les « gagnantes » du changement climatique et les coraux comme les « perdants ».** Les cyanobactéries sont responsables des transitions d'un recouvrement corallien vers une dominance algale et sont souvent capables d'émettre des toxines avec des conséquences écologiques et sanitaires graves. Il est donc essentiel de comprendre les effets des changements globaux sur ces producteurs primaires.

La plupart des études expérimentales sur l'acidification des océans et l'augmentation des températures ont été réalisées sur des espèces isolées et leur transposition vers un écosystème complexe permettra de modéliser de manière plus réaliste l'adaptation des espèces aux changements climatiques.

Les premiers résultats suggèrent qu'avec la persistance de l'augmentation de l'acidification des océans et de l'augmentation de la température, la pression de contrôle exercée par les herbivores sur les cyanobactéries sera moindre du fait de la réduction attendue de leur capacité dans la recherche de nourriture, de leur potentiel de reproduction ainsi que de leur plus grande vulnérabilité aux prédateurs. De ce fait, **les blooms de cyanobactéries seront probablement plus fréquents et dureront plus longtemps.** L'analyse des empreintes chimiques des cyanobactéries montrent que l'acidification des océans et l'augmentation des températures n'ont que peu d'influence sur la production des molécules spécialisées qui caractérisent les cyanobactéries du récif corallien. Ces composés, présentant des activités répulsives et toxiques, sont toujours présents dans les cyanobactéries quelles que soient les conditions environnementales. De plus, dans l'interaction corail-cyanobactérie, l'augmentation de température va favoriser le développement des cyanobactéries et fragiliser le développement du corail. L'hypothèse retenue à ce jour est que les cyanobactéries en tant que producteurs primaires utilisent le CO<sub>2</sub> et donc devraient diminuer son impact au niveau local.

Les mesures actuelles de protection des récifs coralliens portent principalement sur les aires marines protégées et notamment sur l'encadrement de l'activité de pêche. Il semble indispensable de mener **une réflexion sur la prise en compte des risques de prolifération des producteurs primaires qui sont nuisibles pour les populations locales** ; il est urgent de réfléchir à la mise en œuvre de moyens pour réguler ces proliférations et protéger les herbivores impliqués dans cette régulation.

### **Les coccolithophores et l'acidification océanique (Coccace) Luc Beaufort (CNRS - Cerege - Aix Marseille Université)**

Les coccolithophores, algues unicellulaires autotrophes, sont responsables de la précipitation de la moitié des carbonates dans l'océan (c'est ce qu'on appelle la pompe à carbonate). Leur exosquelette de calcite est très sensible à l'acidification océanique. Afin d'estimer le futur de cette pompe à carbonate, et donc du cycle du carbone, dans le contexte de l'acidification océanique, **Coccace** vise à caractériser l'optimum et les conditions limites de calcification à différents pH pour de nombreuses souches d'*Emiliana huxleyi*, l'espèce de coccolithophore la plus répandue. Ces souches proviennent de différents environnements océaniques ayant des caractéristiques chimiques très variées comme les zones critiques du bassin chaud du Pacifique ouest, de l'upwelling du Pérou et de la Méditerranée occidentale.

Plusieurs nouvelles techniques permettant la mesure en continu de la calcification du phytoplancton calcaire en culture ont été développées. Vingt-trois souches d'*E. huxleyi* ont été acclimatées pendant 15 jours à cinq pH différents (7,45 ; 7,55 ; 7,70 ; 7,85 et 8,05). Les cellules ont été filmées dans 48 puits (deux répliques) en contrôlant la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère des chambres pendant 76 heures et la calcification a été mesurée en continu. Les cinq expériences montrent que les

optimums de calcification sont bien répartis dans l'environnement. Certaines zones sont donc bien préparées pour les changements climatiques, d'autres feront face à une diminution dramatique de la calcification. Cela explique la disparition d'*E. huxleyi* observée dans certains environnements extrêmes, en réponse à l'acidification : 1) cyclique et naturelle (El Niño et La Niña) dans l'*upwelling* du Pérou ; 2) définitive et anthropique, dans le bassin chaud du Pacifique ouest.

### **L'autre problème des récifs coralliens (Acid-Reefs)**

**Laetitia Hédouin (CNRS - Criobe) représentée par Marc Metian (Agence internationale de l'énergie atomique)**

L'acidification de l'océan a des conséquences néfastes sur les processus de calcification, notamment en fragilisant le squelette calcaire des coraux bioconstructeurs. Ainsi, l'objectif global du projet **Acid-Reefs** est de mieux appréhender la réponse des récifs coralliens face à ce phénomène au travers d'une approche intégrée, allant de la réponse de l'organisme à la prédiction des conséquences écologiques et socio-économiques sur les récifs coralliens.

Un système expérimental avec neuf aquariums contrôlés en pH et température a été construit au sein du Criobe, à Moorea, et des expériences ont été réalisées sur les coraux, les algues et les poissons.

**Les premiers résultats révèlent une très faible perte de croissance et de calcification des coraux dans les scénarios futurs de pH 7,6 attendus pour 2100.** Néanmoins, les travaux réalisés montrent que des coraux blanchis (naturellement en raison d'une anomalie thermique) ont une **calcification fortement diminuée**, et que la **concomitance de l'acidification et du réchauffement climatique pourrait altérer la protection côtière**. **Acid-Reefs dévoile aussi l'influence de l'acidification sur les interactions entre les organismes récifaux.** Bien que l'acidification ait un faible impact sur la calcification des coraux, **un effet prononcé sur le comportement des larves coralliennes est observé, qui pourrait à terme altérer la capacité des récifs à se repeupler naturellement.**

Acid-Reefs a pour ambition de sensibiliser les populations insulaires sur les risques de protection côtière afin de promouvoir l'engagement de la société civile à lutter contre le changement climatique.

À cette fin, les résultats du projet Acid-Reefs ont été présentés auprès du grand public lors de la « Journée des Océans », le 9 juin dernier en Polynésie française ; la [newsletter #1 d'Acid-Reefs](#) a été distribuée et une série de photographies de squelettes coralliens acidifiés a été exposée pour expliquer l'enjeu pour la protection côtière des îles récifales.

#### ENCADRÉ

Recherche et innovation :  
les outils d'accompagnement pour les filières

**Laurent Bouvier – directeur adjoint à la direction des pêches maritimes et de l'aquaculture – ministère de l'Agriculture et de l'alimentation**

Le ministère de l'Agriculture et de l'alimentation insiste sur l'importance de disposer de connaissances scientifiques pour construire les politiques publiques et avoir des prolongements opérationnels. Il est donc nécessaire de construire un lien entre les scientifiques et les opérateurs : les scientifiques ayant un rôle à jouer pour aider les professionnels à trouver des solutions opérationnelles.

Le Fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche (FEAMP) est un outil d'accompagnement pour les filières et pour l'acquisition de connaissances au profit de celles-ci.

#### **Késako ?**

Le fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche (FEAMP) intervient dans le cadre de la politique commune de la pêche et de la politique maritime intégrée.

#### **Pour financer quoi ?**

Le programme opérationnel du FEAMP est géré par la direction des Pêches maritimes et de l'aquaculture (DPMA) du ministère de l'Agriculture et de l'alimentation. La gestion d'une partie des mesures du fonds est déléguée aux régions littorales.

Pour la période 2014-2020, la France bénéficie d'une enveloppe de 588 millions d'euros de crédits du FEAMP. Ce budget permet d'intervenir sur diverses priorités :

- l'encouragement pour une pêche et une aquaculture durables, innovantes et compétitives, fondées sur les connaissances ;
- l'encouragement de la mise en œuvre de la politique commune de la pêche et de la politique maritime intégrée ;
- l'amélioration de l'emploi et le renforcement de la cohésion territoriale ;
- l'encouragement de la commercialisation et de la transformation des produits de la pêche et de l'aquaculture.

Le FEAMP apporte un soutien financier complémentaire à des crédits nationaux déjà mobilisés. Le demandeur devra apporter une « contrepartie nationale », qui peut prendre différentes formes : la capacité financière du porteur (autofinancement), les financements externes publics (État, collectivités locales, établissements publics, chambres consulaires, etc.) et / ou privés (fondations, entreprises, etc.).

**Un mot des acteurs** - *Professionnels et associations : quels constats ? Quelles problématiques de terrain ? Quelles réponses apportées ?*

#### **Présentation du Centre international de coordination de l'acidification des océans de l'Agence internationale de l'énergie atomique – Marc Metian**

Le Centre international de coordination de l'acidification des océans (OA-ICC) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) encourage la collaboration internationale sur l'acidification des océans. Elle sert de plaque tournante pour communiquer, promouvoir et faciliter les activités internationales sur l'acidification des océans. Celles-ci sont divisées en trois catégories : science, renforcement des capacités et communication. Le public cible n'est pas seulement les scientifiques, mais tout groupe ou individu intéressé par l'acidification des océans, comme les décideurs politiques, les médias, les écoles et le grand public.

Le Centre international de coordination de l'acidification des océans organise ainsi des cours et formations pour les États membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Il compile et centralise également les informations sur l'acidification des océans pour donner accès aux données et aux ressources afin de faire avancer la recherche sur l'acidification des océans.

Le Centre encourage aussi le développement de portails de données, d'une méthodologie standardisée et des meilleures pratiques. Il s'efforce de sensibiliser le public à ce problème et de renseigner sur le rôle que les techniques nucléaires et isotopiques peuvent jouer dans l'évaluation des risques de l'acidification des océans. Pour atteindre ces objectifs, le Centre travaille avec de nombreux partenaires internationaux et soutient les réseaux mondiaux et régionaux

d'acidification des océans, y compris le *Global Ocean Acidification Observing Network*. Le Centre bénéficie de la contribution d'éminents chercheurs sur l'acidification des océans et d'organisations aux quatre coins du monde.

### **Présentation de l'Association monégasque pour l'acidification des océans – Jean-Pierre Gattuso**

La Fondation Prince Albert II de Monaco est à l'initiative de la création de l'Association monégasque pour l'acidification des océans (AMAO). Sa création effective a été annoncée publiquement par S.A.S le Prince Souverain lors de son discours du 3 décembre 2013 à l'occasion de la réunion de l'*Ocean Acidification International Reference User Group*. Les objectifs de l'Association sont de communiquer, promouvoir et faciliter des actions internationales sur l'acidification des océans et les autres facteurs de stress globaux sur l'environnement marin. Ainsi, elle s'engage à homogénéiser la communication entre les différentes institutions œuvrant à Monaco contre l'acidification des océans : la Fondation Prince Albert II et le gouvernement de Monaco, les laboratoires de l'environnement de l'Agence internationale de l'énergie atomique, le Centre scientifique de Monaco et l'Institut océanographique de Monaco. De plus, elle est composée de représentants de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) et du Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Afin de financer des projets destinés à lutter contre l'acidification des océans, l'Association monégasque pour l'acidification des océans est en mesure de collecter des fonds provenant de bailleurs privés.

#### **Organismes partenaires de l'AMAO :**

- **L'Institut océanographique** : L'Institut océanographique, fondé en 1906 par le Prince Albert Ier de Monaco, soutient la mise en place d'une gestion durable des océans à même de concilier préservation de la biodiversité et activités économiques respectueuses des écosystèmes marins. S'appuyant sur le Musée océanographique de Monaco et la Maison des océans à Paris, il intervient comme médiateur entre la communauté scientifique, les acteurs de l'économie maritime, les décideurs politiques et le grand public.

Dans la continuité de la Déclaration de Monaco de 2009, le Musée océanographique accueille régulièrement des rencontres de haut niveau sur l'acidification des océans. Pour découvrir l'ensemble des activités : <http://www.institut-ocean.org>

- **Le Centre scientifique de Monaco** : Le Centre scientifique de Monaco (CSM) est un organisme public autonome de recherche dépendant de la Principauté de Monaco. Créé en 1960 par le Prince Rainier III, il comprend à ce jour trois départements de recherche : le département de Biologie marine, créé en 1990, le département de Biologie polaire, créé en 2012 et le département de Biologie médicale créé en 2013. Le département de biologie marine est spécialisé dans l'étude des milieux coralliens, du gène aux sociétés humaines en passant par l'écosystème. Ses chercheurs ont été parmi les premiers à s'intéresser aux effets de l'acidification des océans sur les coraux. Depuis 2010, il co-organise avec l'Agence internationale de l'énergie atomique le workshop « Économie de l'Acidification des Océans ». Pour plus d'informations : <http://www.centrescientifique.mc>

- **L'Agence internationale de l'énergie atomique** : L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) est le centre mondial de la coopération dans le domaine du nucléaire. Elle a été fondée en 1957 sous l'égide des Nations unies. Elle a pour mission de promouvoir des technologies nucléaires sûres, sécurisées et pacifiques. Les techniques nucléaires et isotopiques sont des outils précieux pour la recherche sur l'acidification des océans et les laboratoires de l'Environnement de l'AIEA à Monaco coordonnent des activités consacrées à ce problème environnemental global. Dans le cadre de son programme « *Peaceful*

*Uses Initiative* », l'Agence a lancé en 2012 le Centre International de Coordination sur l'Acidification des Océans, qui a pour objectif de promouvoir et faciliter une série d'activités internationales sur l'acidification des océans. Pour plus d'informations : <http://www.iaea.org/ocean-acidification>

• **La Fondation Prince Albert II de Monaco** : En juin 2006, S.A.S le Prince Albert II de Monaco a décidé de créer sa Fondation afin de répondre aux menaces préoccupantes qui pèsent sur l'environnement de notre planète. La Fondation finance des projets dans trois principales régions géographiques : le bassin méditerranéen, les régions polaires et les pays les moins avancés. Les actions de la Fondation se concentrent sur trois domaines principaux : le changement climatique et les énergies renouvelables ; la biodiversité ; ainsi que la gestion intégrée et durable des ressources en eau et la lutte contre la désertification.

### Discussion avec les participants

Des recherches sont en cours pour étudier le rôle de l'acidification sur le comportement sensoriel des larves de corail comme cela est fait pour les poissons. Aucune réaction significative sur la croissance des métabolites<sup>5</sup> des algues n'a été constatée, mais il faudrait pouvoir les tester sans substrat. De façon générale, les approches écosystémiques in situ sont de plus en plus utilisées.

Les effets combinés de certains facteurs sont à prendre en compte pour évaluer les impacts et estimer le pas de temps auquel on aura à faire face à des bouleversements irréversibles. La température a un rôle très important, mais l'eutrophisation peut aggraver l'acidification alors que la pollution peut amplifier ou ajouter des effets. Il est donc nécessaire de travailler, dans un premier temps, facteur par facteur.

Quelques informations peuvent être tirées du passé. En effet, la diminution du CO<sub>2</sub> sur les derniers millions d'années avait entraîné une diminution de la calcification, puis, suite à une période de forte acidification (en même temps que l'extinction des dinosaures au Crétacé), il ne restait plus que cinq espèces de coccolithophores sur 250.

Plusieurs associations mènent des actions de sensibilisation aux questions environnementales liées à l'océan, et notamment à l'acidification, ou de soutien aux organismes institutionnels par de l'observation et de la science participative, souvent sans soutien financier. Il existe également de nombreuses initiatives menées par des associations au niveau local, avec l'appui de chercheurs. L'apport des sciences participatives est plutôt adapté à l'observation et à la récolte d'échantillons.

En cas de crise, il est difficile pour les chercheurs de réagir rapidement, car leurs financements dépendent des appels à projets.

La Direction inter-régionale Nord Atlantique - Manche Ouest interpelle les scientifiques pour la consultation en cours des documents stratégiques de façade au titre des directives « Planification des espaces maritimes » et « Stratégie pour les milieux marins », documents auxquels a été associée la recherche.

En clôture de ces discussions, le président du Conseil scientifique du programme, Jean-Pierre Gattuso, et le président du comité d'orientation, Laurent Bergeot, relèvent la qualité des échanges entre les scientifiques, les professionnels et les associations. Ils soulignent l'importance de renforcer cette dynamique, de

poursuivre ce programme, qui se termine fin 2020, et de l'élargir, aussi bien au niveau des projets scientifiques que des partenaires, pour en faire un programme intégrateur. Des prolongements peuvent également être mis en place avec les financements du fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche (FEAMP).

---

## Clôture

---

### **François Houllier** **PDG Ifremer**

François Houllier, Président Directeur Général de l'Ifremer, se réjouit que le centre Atlantique de l'Ifremer, basé à Nantes, ait accueilli le colloque à mi-parcours du programme de recherche « Acidification des océans ». En effet, les laboratoires du centre Atlantique concentrent leurs activités dans le domaine de l'étude des ressources vivantes.

L'acidification des océans est un sujet important sur lequel de nombreux établissements mènent des recherches puisqu'il est essentiel pour la vie des océans et qu'il est évidemment lié au changement climatique. Cette thématique revêt une importance qui est relatée au cours de plusieurs réunions au niveau national ou international, sur les aires marines protégées (AMP), les systèmes d'observation, les sciences participatives, les objectifs de développement durable (ODD), etc.

Des chercheurs de l'Ifremer sont impliqués dans la compréhension du phénomène d'acidification dans l'Atlantique Nord avec les impacts sur les coraux d'eau froide, dans l'observation et le suivi du phénomène grâce aux données spatiales ou in situ fournies par les flotteurs ARGO, et dans le suivi des ressources biologiques et les impacts de l'acidification sur celles-ci. Ces recherches sont menées en partenariat avec d'autres établissements et instituts de recherche. Il y a un enjeu particulier sur le côtier notamment en raison de la logique d'adaptation que les populations devront opérer. L'Ifremer est moins présent sur l'étude des écosystèmes, mais d'autres organismes de recherche interviennent.

Au niveau organisationnel, il faut mobiliser des moyens, du temps et changer les façons de travailler. Il faut miser sur les dimensions multifactorielles et collaboratives entre les organismes et établissement, avec les professionnels, avec les responsables de politiques publiques et avec la société civile. Il y a un besoin de réactivité et donc la mise en place d'une enveloppe réservée serait à prévoir. La programmation, au sens programme de recherche, est réalisée pour donner de la visibilité, de la cohérence et du sens.