



# ACIDIFICATION DES OCÉANS

## Fiche résultat

### ACIDOSCOPE

#### Acidification de l'océan: Projections, Régionalisation et Cartographie

Projet porté par Laurent Bopp (ENS)

Début et fin du projet : 2017-2020

Site internet : <http://acidoscope.ipsl.fr/>

#### Résumé

L'acidification de l'océan (AO) est liée à l'absorption par l'océan mondial de près de 30 % des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>. Si nous savons que le pH moyen de l'océan de surface a déjà diminué de 0.1 unité pH depuis le début de la période industrielle, le projet ACIDOSCOPE a permis de mieux documenter l'évolution potentielle future de l'acidification des océans. Ces projections sont mises à disposition de la communauté scientifique pour des études d'impacts sur les organismes et écosystèmes marins. Le projet s'est également intéressé à l'acidification de l'océan Arctique en montrant le rôle particulier d'autres facteurs d'acidification comme les apports de carbone par les grands fleuves, dont il faut tenir compte pour réaliser des projections plus réalistes.

#### Contexte et objectifs

L'AO est un phénomène bien compris et bien documenté. Nous savons aussi que l'évolution future de cette acidification est avant tout fonction des scénarios d'évolution de la concentration atmosphérique de gaz carbonique au cours des prochaines décennies. Les projections pour le 21<sup>e</sup> siècle, réalisées avec les modèles Système-terre développés par la communauté internationale, sont relativement

robustes pour l'océan de surface et quantifient cette diminution future du pH d'ici 2100 entre -0.06 et -0.31 unités pH pour l'ensemble des scénarios testés. Cette acidification correspond à une augmentation de l'acidité, exprimée en concentrations de protons, de +15 à +105 % d'ici 2100. Ces changements d'acidité de l'eau de mer sont accompagnés de modifications de toute la chimie des carbonates (concentrations en ions carbonates, bicarbonates, état de saturation pour la calcite, pour l'aragonite, etc.) – qui vont impacter le fonctionnement des écosystèmes marins et les services écosystémiques.

Bien que ces projections soient robustes à l'échelle globale, les erreurs potentielles sont encore importantes quand on se focalise à petite échelle sur certaines zones spécifiques (océan Arctique, zones côtières, etc.) ou quand on s'enfonce dans l'océan profond.

Dans le cadre du projet ACIDOSCOPE, les objectifs sont de :

- calculer l'évolution du pH et des variables associées pour les nouveaux scénarios du Giec (Projections),
- mieux cartographier l'évolution régionale de cette acidification en utilisant des outils numériques à plus haute résolution spatiale et en testant le rôle d'autres facteurs d'acidification (Régionalisation),
- et de mettre en place un serveur permettant de distribuer ces scénarios à la communauté scientifique et aux autres utilisateurs potentiels (Cartographie).

## Méthode et approches utilisées pour le projet

Le travail effectué dans le cadre du projet ACIDOSCOPE s'inscrit autour de 3 axes principaux :

**(1) Projections :** Les chercheurs ont piloté l'exercice international d'inter-comparaison des projections réalisées avec les modèles climatiques pour l'acidification de l'océan (dans le cadre de CMIP6). Ils ont montré que dans le scénario SSP5-8.5 (émissions importantes), le pH moyen en surface de l'océan baisse de 0.44 à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (par rapport au pré-industriel), alors qu'il ne baisse que de 0.16 dans le scénario SSP1-2.6 (atténuation importante) (Kwiatkowski *et al.* 2020). Dans ce cadre, ils ont aussi analysé l'évolution future de l'acidification pour les milieux benthiques (Kwiatkowski *et al.* 2020), et pour l'amplitude du cycle saisonnier du pH et de la concentrations des ions H<sup>+</sup> (Kwiatkowski *et al.* 2018).

**(2) Régionalisation :** Les chercheurs ont principalement travaillé sur l'acidification de l'océan Arctique, en montrant comment nous pouvons réduire les incertitudes inter-modèles dans les projections en appliquant la technique des contraintes émergentes (Terhaar *et al.* 2020), en démontrant le rôle de la représentation de la circulation océanique à plus haute résolution spatiale (Terhaar *et al.* 2018), et en explicitant le rôle potentiel des apports fluviaux dans l'acidification de cet océan (Terhaar *et al.* 2020, Terhaar *et al.* 2019).

**(3) Cartographie :** Grâce à une collaboration avec GraphicPrototype, partenaire du projet, les participants au projet ont mis en place un site internet de visualisation et de distribution des projections de l'acidification future à partir des simulations CMIP5 ([acidoscope.ipsl.fr](http://acidoscope.ipsl.fr)). Les nouvelles projections CMIP6 seront distribuées par l'Atlas Interactif mis en place par l'IPCC, à compter de l'automne 2021.

Dans le projet ACIDOSCOPE, les chercheurs ont principalement utilisé des modèles numériques qui simulent le cycle du carbone dans l'océan. Ces outils numériques permettent de tester beaucoup d'hypothèses (par exemple le rôle des différents

facteurs anthropiques qui pilotent l'évolution de l'acidification de l'océan : augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, apports par les fleuves, ou dépôts atmosphériques), et de réaliser des projections en fonction de l'évolution de ces facteurs. Ils ont utilisé en particulier :

- le modèle NEMO-PISCES (Aumont *et al.* 2015), modèle de biogéochimie marine, qui simule le cycle du carbone océanique ;
- le modèle de circulation générale océanique Nemo, avec plusieurs résolutions horizontales (de 2° à 0.25°) ;
- et un ensemble de modèles climatiques développés à l'international et qui participent aux exercices d'inter-comparaison de modèles CMIP5 et CMIP6.

## Principales conclusions

Les principaux résultats obtenus dans le cadre du projet ACIDOSCOPE peuvent être résumés en 3 points :

(1) Les nouvelles projections démontrent, pour le scénario SSP5-8.5, une acidification moyenne plus sévère que dans celles réalisées dans le cadre de l'exercice précédent (CMIP5, Scénario RCP8.5, Bopp *et al.* 2013) – cela s'explique par les nouveaux scénarios utilisés qui prévoient une évolution vers des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> plus importantes d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

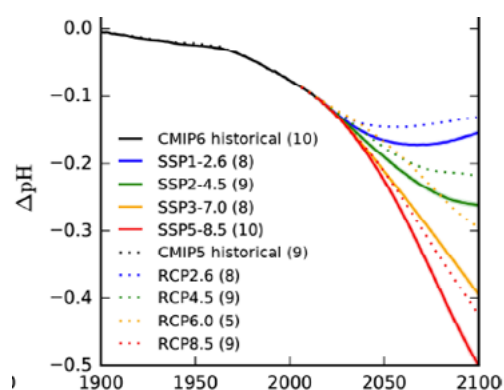


Figure 1 : Anomalies du pH en surface de l'océan (moyenne multi-modèles) pour la période historique et les différents scénarios

(2) Les chercheurs ont réduit l'incertitude associée aux projections de l'acidification de l'océan Arctique. Leurs résultats indiquent un stockage de carbone anthropique et une acidification des océans plus importants que ce qui avait été prévu précédemment et augmentent donc la probabilité que de grandes parties de l'océan Arctique mésopélagique soient « corrosifs » pour la calcite d'ici 2021.

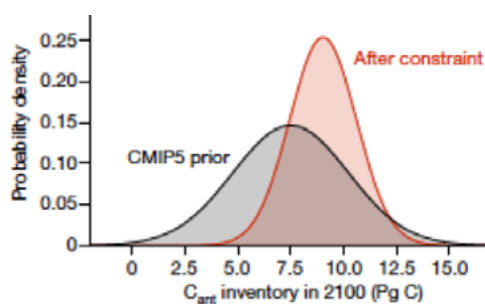


Figure 2 : Inventaires de carbone anthropique (responsable de l'acidification) en Arctique à la fin

du 21<sup>e</sup> siècle dans les modèles Système Terre (courbe noire) et après application de la contrainte émergente (courbe rouge).

(3) En estimant les effets de modifications des apports fluviaux sur l'acidification en zone côtière, en particulier pour l'océan Arctique (Terhaar et al. GBC 2019), ils ont ainsi démontré que ne pas prendre en compte les effets des flux de carbone fluviaux conduit à des projections biaisées du pH dans les mers épicontinentales de l'Arctique.

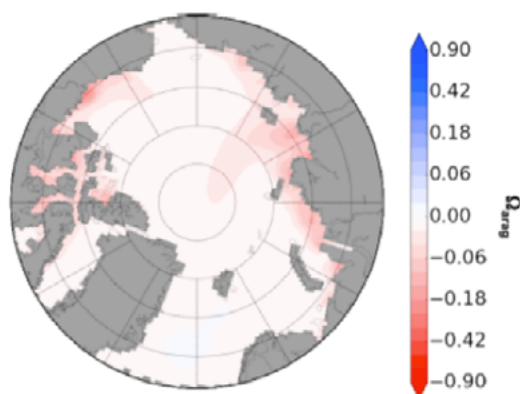


Figure 3 : Modification du pH de surface en réponse à un doublement des apports fluviaux de carbone organique dissous à l'océan Arctique

### **Impact des résultats pour la science et la société, la décision publique et privée**

Au delà des publications scientifiques (~10 publications remerciant ACIDOSCOPE, dont 3 dans des revues à fort impact – Nature, Nature Climate Change et Nature Communications), l'outil principal de diffusion des résultats correspond aux rapports du Giec – et en particulier aux rapports d'évaluation du 6<sup>e</sup> cycle du Giec, qui ont impliqué de nombreux participants du projet ACIDOSCOPE.

Les avancées scientifiques et la prise en compte des apports fluviaux permettent d'affiner les projections et de réduire les incertitudes. De plus les outils de cartographie, la création d'une nouvelle chaire de recherche ENS-Chanel sur le cycle du carbone dans l'océan, financé à l'Ecole normale supérieure par la société Chanel (<http://chairechanel.ens.fr/home/>) et d'un site internet (<http://acidoscope.ipsl.fr>) permettent une appropriation large de ces connaissances sur l'acidification de l'océan.

#### **PARTICIPANTS :**

Laurent BOPP, ENS / James ORR, LSCE-CEA / Marion GEHLEN, LSCE-CEA / Lester KWIATKOWSKI, LOCEAN-CNRS / Jens TERHAAR, LSCE / Tilla ROY, LMD-ENS / Olivier TORRES, LMD-ENS / Christian ETHE, LOCEAN-CNRS.