

# Acidification des océans : projections, régionalisation et cartographie (Projet ACIDOSCOPE)

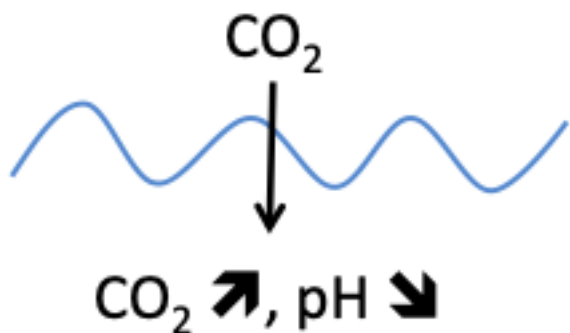
Laurent Bopp

DR CNRS / Professeur attaché ENS  
LMD/IPSL, Ecole Normale Supérieure

Marion Gehlen (LSCE/IPSL), James Orr (LSCE/IPSL), Lester Kwiatkowski (LOCEAN-IPSL)

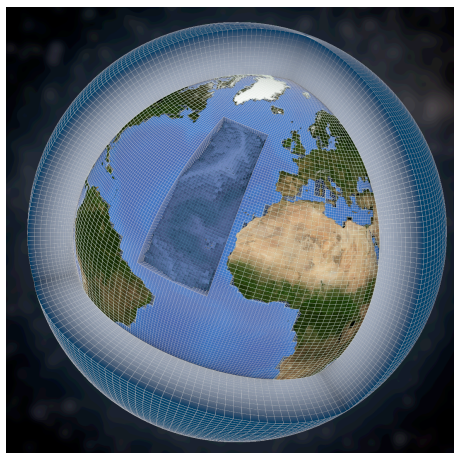
# Quel océan demain ?

## (1) Le principe



## (2) Les outils

Modèles  
Système  
Terre

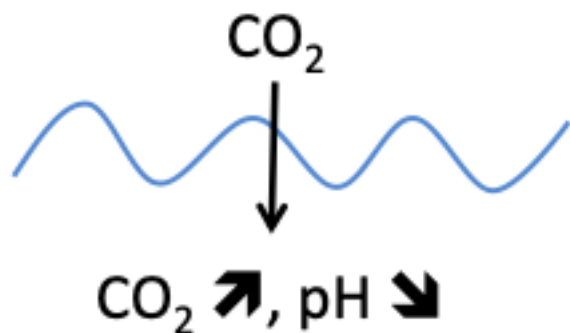


(voir [acidoscope.ipsl.fr](http://acidoscope.ipsl.fr))

# Quel océan demain ?

## (3) Les projections

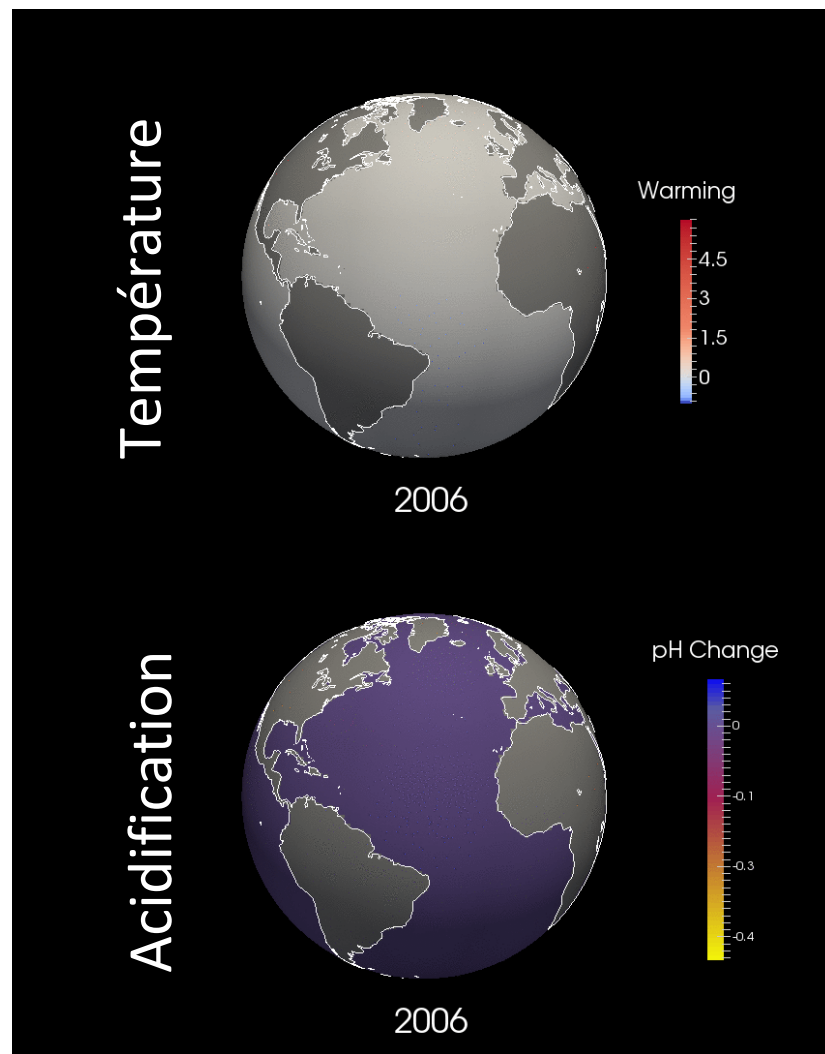
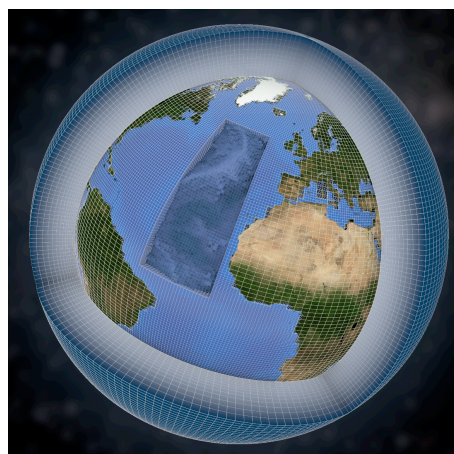
### (1) Le principe



### (2) Les outils

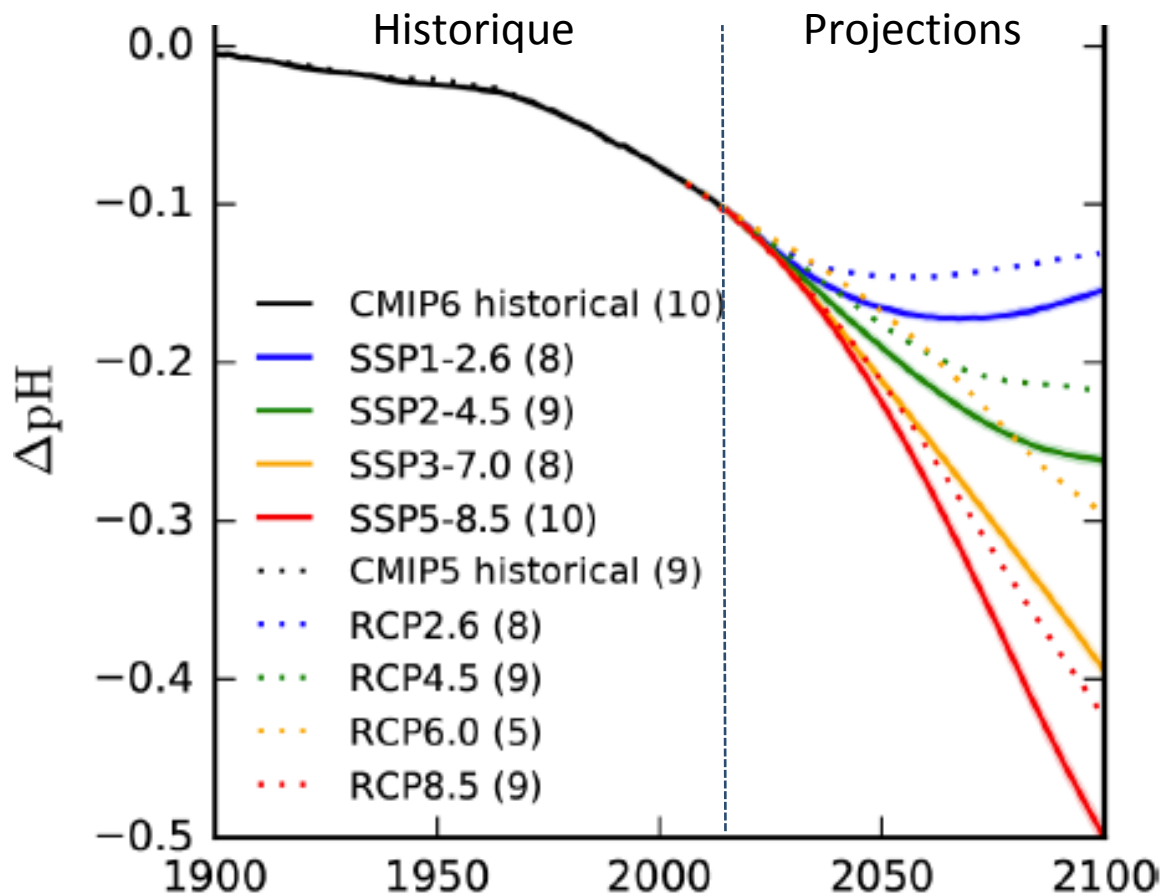
Modèles  
Système  
Terre

(voir [acidoscope.ipsl.fr](http://acidoscope.ipsl.fr))



# Projections de l'acidification de l'océan au 21<sup>ème</sup> siècle

- ★ Mise à jour des projections avec les nouveaux scénarios du GIEC (CMIP6)
- ★ Acidification plus sévère que dans les scénarios précédents
- ★ L'acidification future dépend au 1<sup>er</sup> ordre du scénario envisagé (et donc du CO<sub>2</sub> atmosphérique)
- ★ Les projections sont robustes et homogènes spatialement

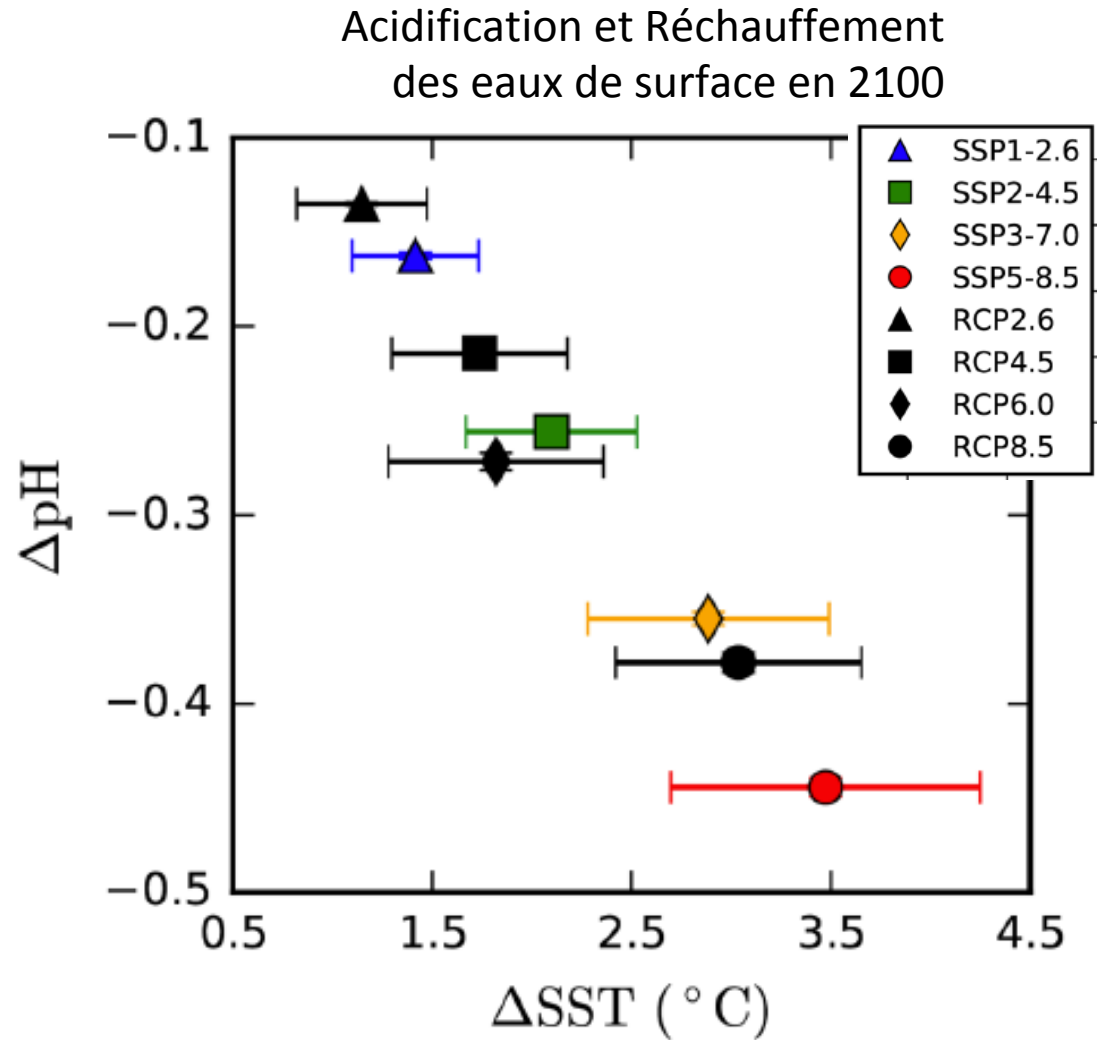


(Kwiatkowski et al. 2020)



# Projections de l'acidification de l'océan au 21<sup>ème</sup> siècle

- ★ Mise à jour des projections avec les nouveaux scénarios du GIEC (CMIP6)
- ★ Acidification et réchauffement moyen sont très bien corrélés
- ★ La limitation du réchauffement global à 2°C permet de limiter l'acidification à moins de -0.2 unité pH



(Kwiatkowski et al. 2020)

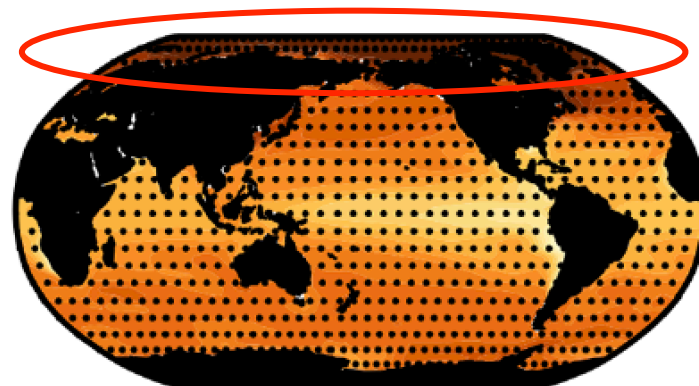
Au delà des aspects globaux...

- ✦ Réduction des incertitudes des projections à **l'échelle régionale**
- ✦ Prise en compte des variations **journalières et saisonnières**
- ✦ Rôle des autres facteurs de l'acidification - **apports continentaux**

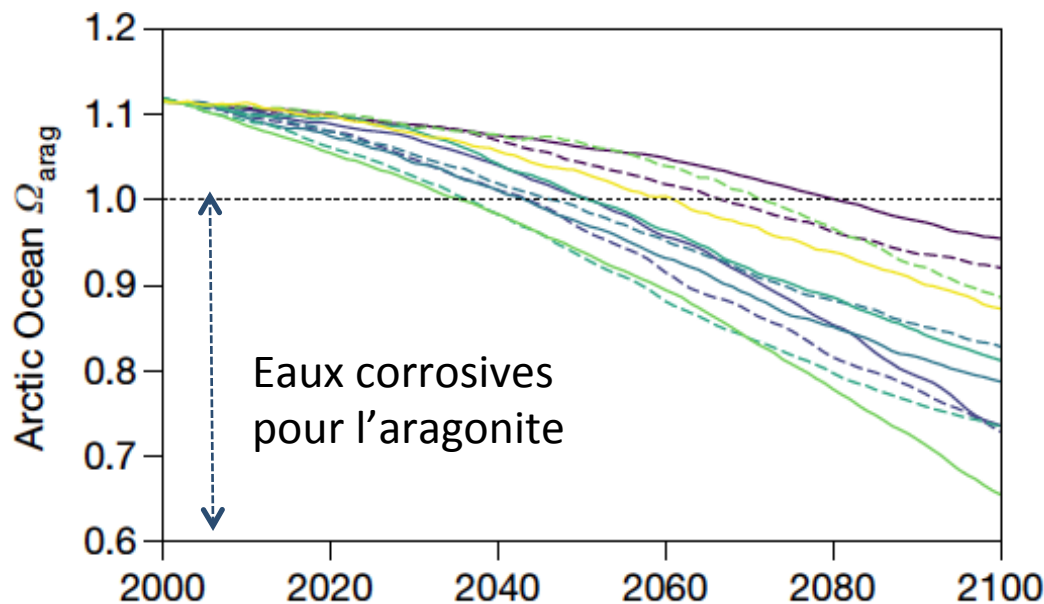
# (1) Réduction des incertitudes des projections à l'échelle régionale

- ◆ L'océan Arctique est particulièrement **vulnérable** à l'acidification
- ◆ Les projection futures sont **très incertaines** – en particulier en profondeur

$\Delta\text{pH}$  en 2100 (SSP5-8.5)



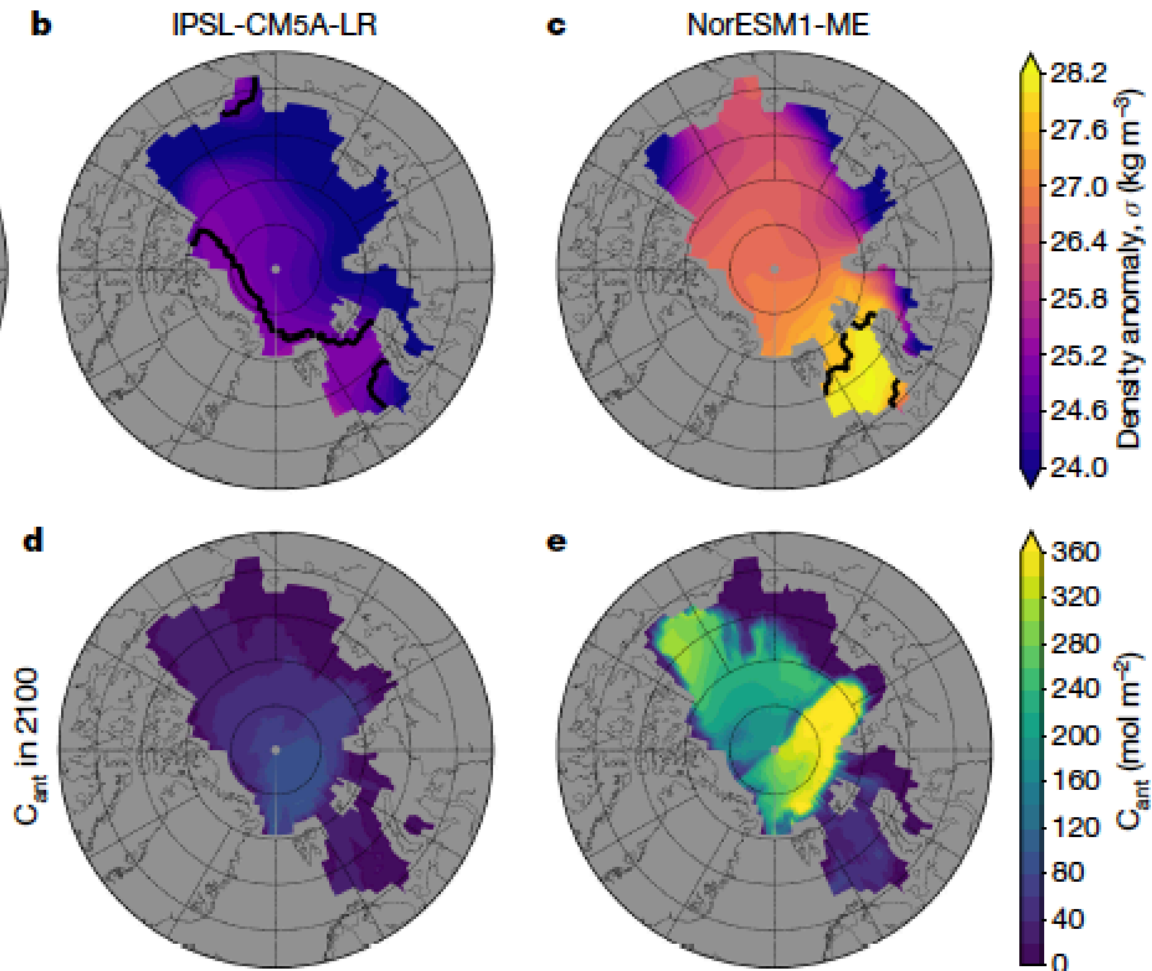
Incertainitude



(Terhaar et al. Nature 2020)

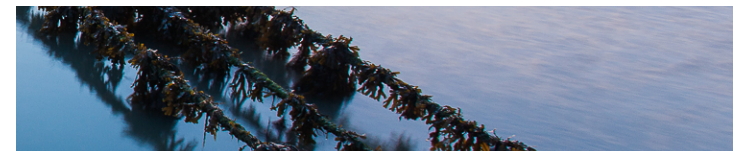
# (1) Réduction des incertitudes des projections à l'échelle régionale

- ✦ L'océan Arctique est particulièrement vulnérable à l'acidification
- ✦ Les projection futures sont très incertaines – en particulier en profondeur



- ✦ Relation forte entre densité de surface, formation d'eaux profondes arctiques et stockage de carbone anthropique

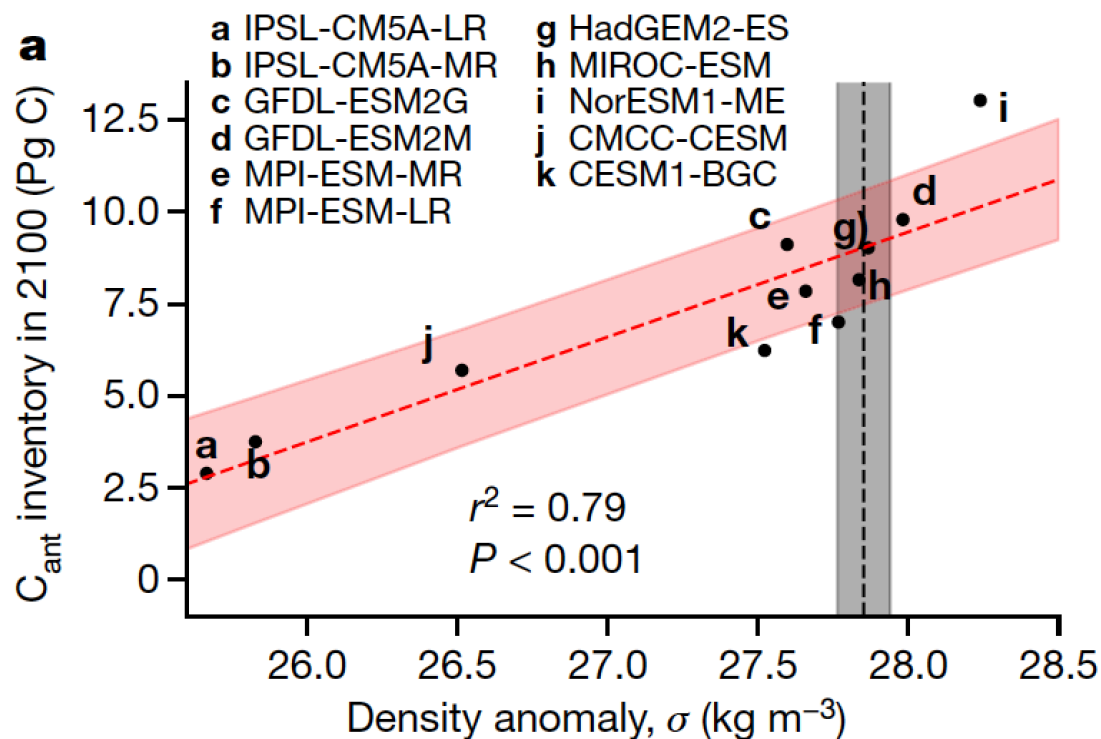
(Terhaar et al. Nature 2020)





# (1) Réduction des incertitudes des projections à l'échelle régionale

- ✦ L'océan Arctique est particulièrement vulnérable à l'acidification
- ✦ Les projection futures sont très incertaines – en particulier en profondeur

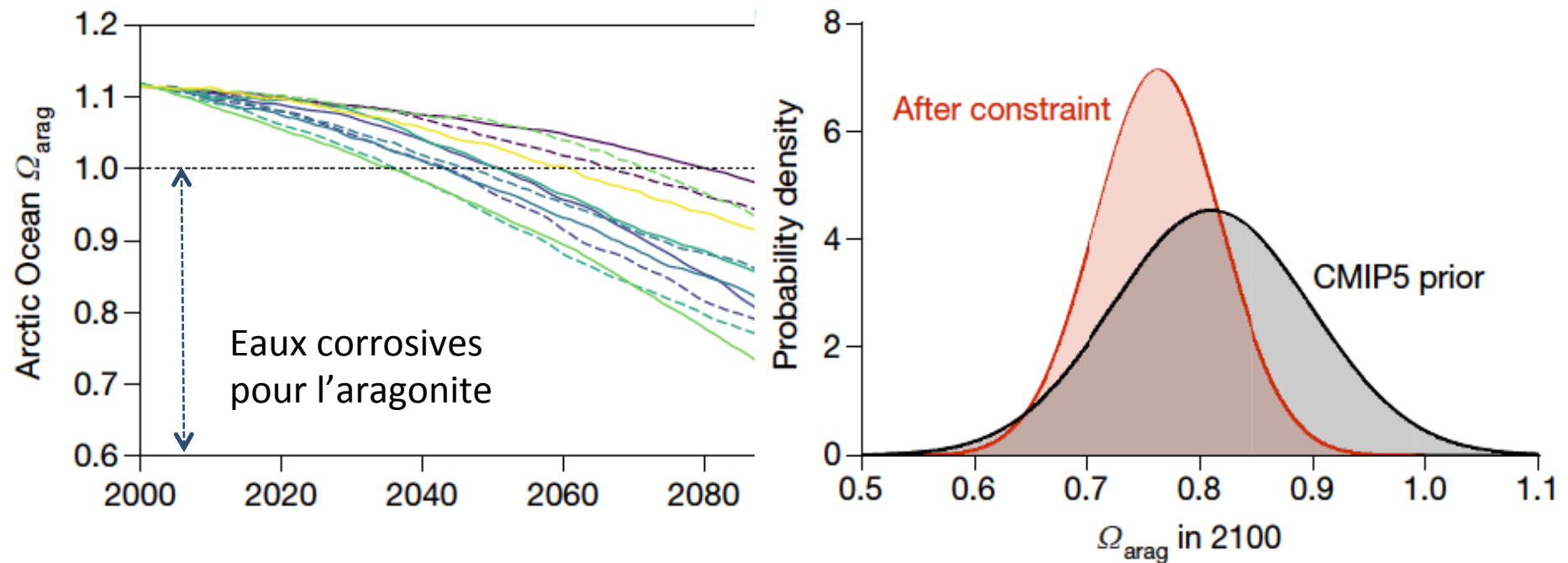


- ✦ Relation forte entre densité de surface, formation d'eaux profondes arctiques et stockage de carbone anthropique

(Terhaar et al. Nature 2020)

# (1) Réduction des incertitudes des projections à l'échelle régionale

- ◆ L'océan Arctique est particulièrement vulnérable à l'acidification
- ◆ Les projection futures sont très incertaines – en particulier en profondeur



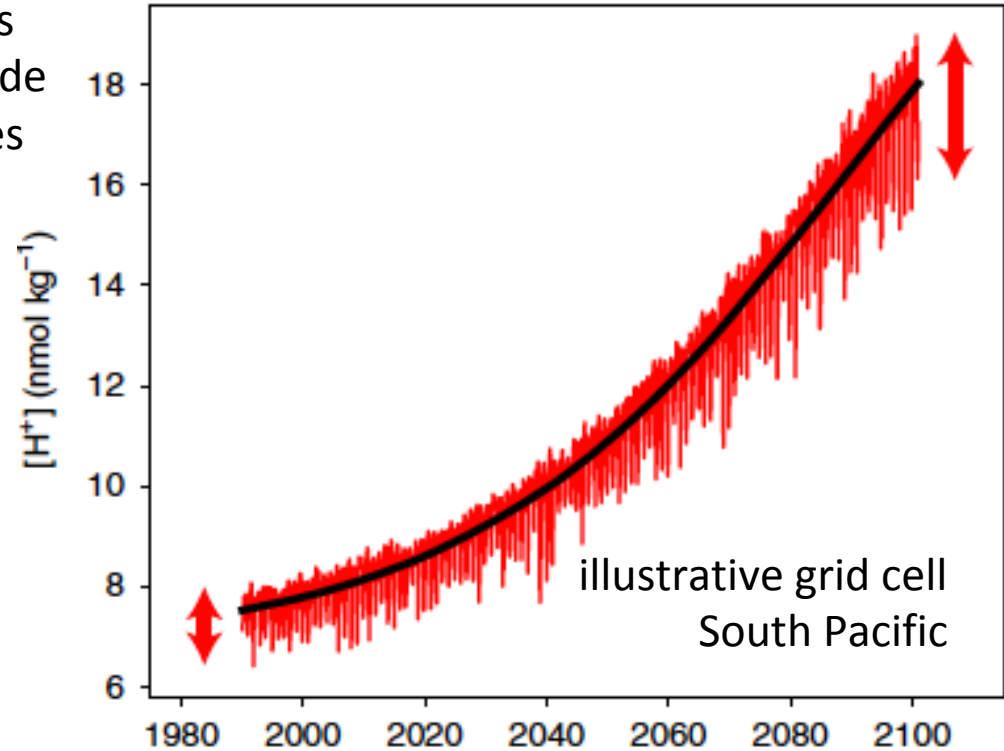
- ◆ Acidification **plus sévère** après **réduction de l'incertitude** via une contrainte émergente

(Terhaar et al. Nature 2020)

## (2) Prise en compte des variations **journalières et saisonnières**

### ★ **Amplification du cycle saisonnier** de la concentration en $[H^+]$ de +80% en 2100

Les changements de saisonnalité projetés auraient tendance à exacerber les effets de l'augmentation de  $[H^+]$  sur les organismes marins au cours de été.



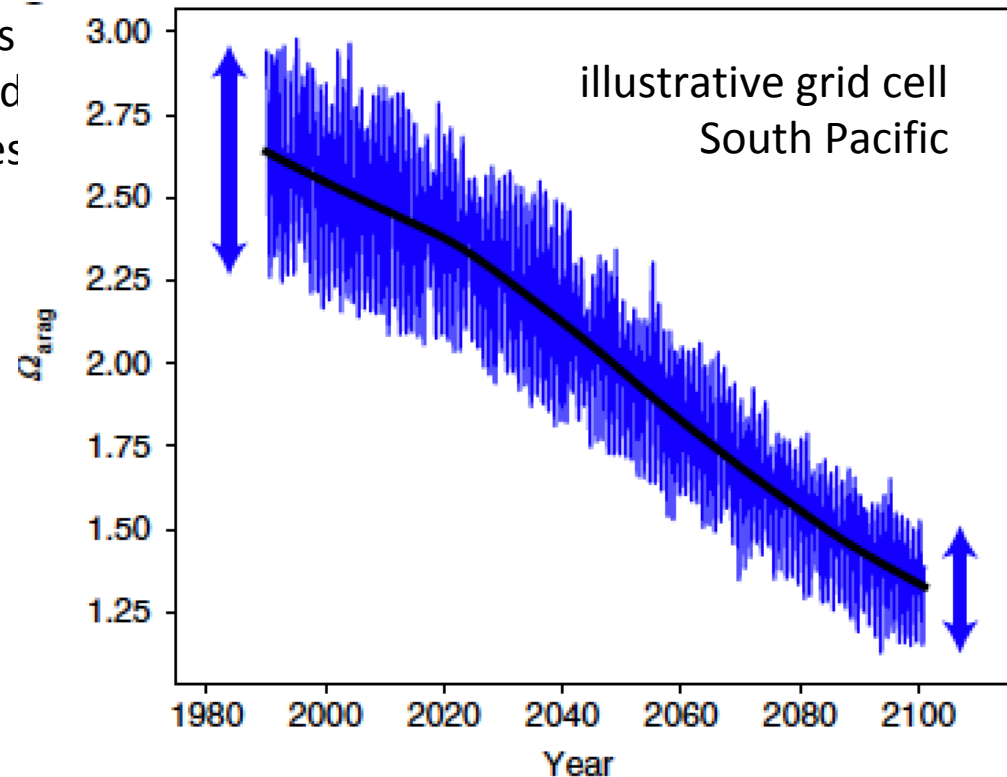
(Kwiatkowski and Orr, Nature Geosc., 2018)

## (2) Prise en compte des variations **journalières et saisonnières**

- ★ **Amplification du cycle saisonnier** de la concentration en  $[H^+]$  de +80% en 2100

Les changements de saisonnalité projetés auraient tendance à exacerber les effets de l'augmentation de  $[H^+]$  sur les organismes marins au cours de été.

- ★ **Atténuation du cycle saisonnier de la saturation en aragonite** (sauf dans les subtropiques)

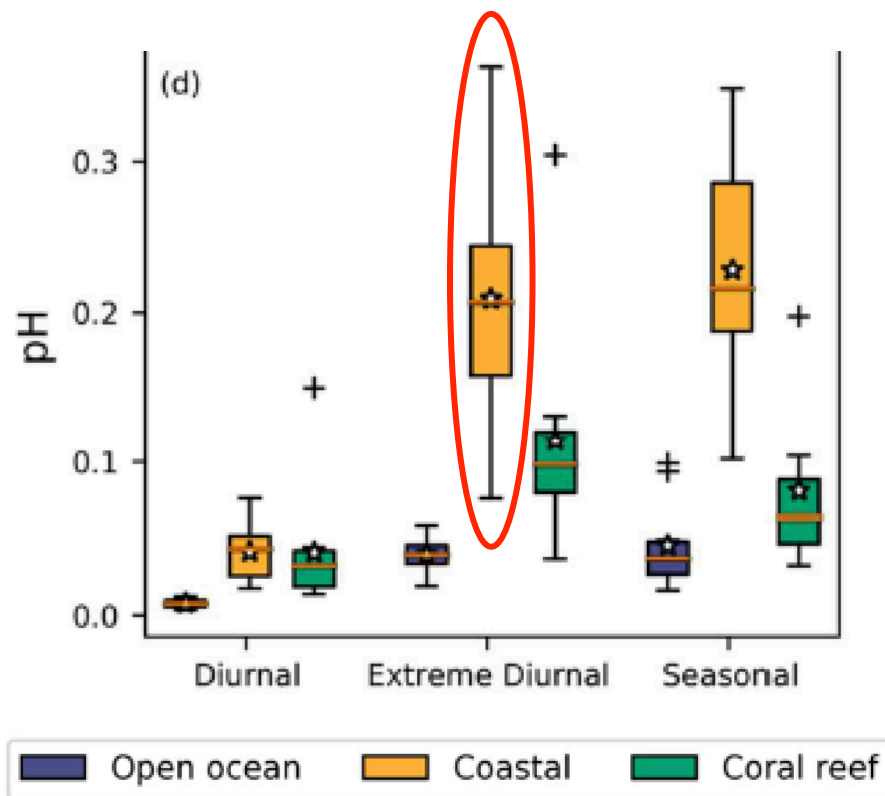
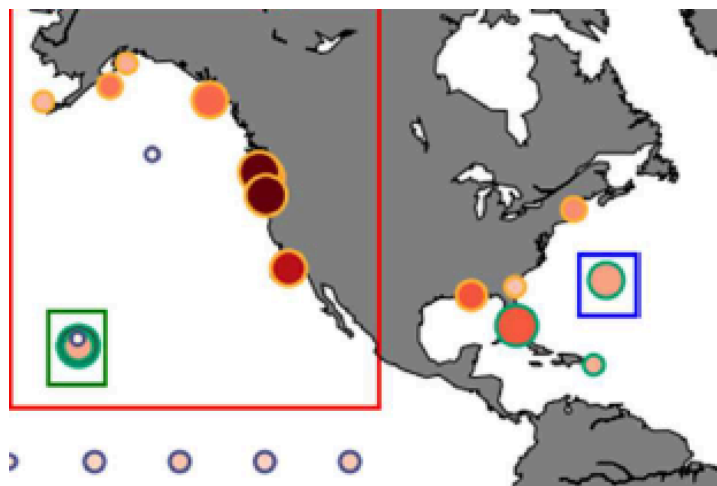


(Kwiatkowski and Orr, Nature Geosc., 2018)



## (2) Prise en compte des variations **journalières** et **saisonnnières**

- ★ **Amplification du cycle saisonnier** de la concentration en  $[H^+]$  de +80% en 2100
- ★ **Les cycles diurnes du pH peuvent être de très grande amplitude** (0.1 à 0.4 unité pH en site côtier)

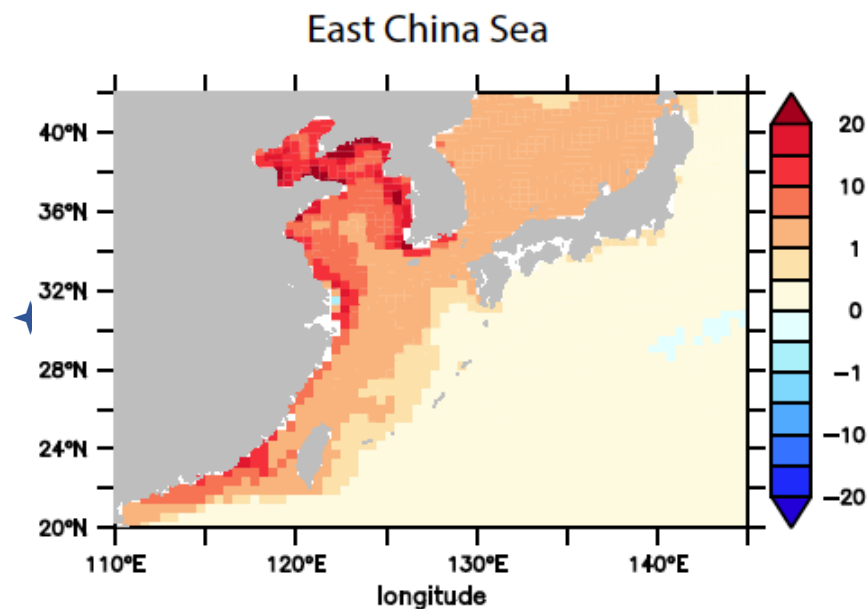


(Torres et al. GRL 2021)

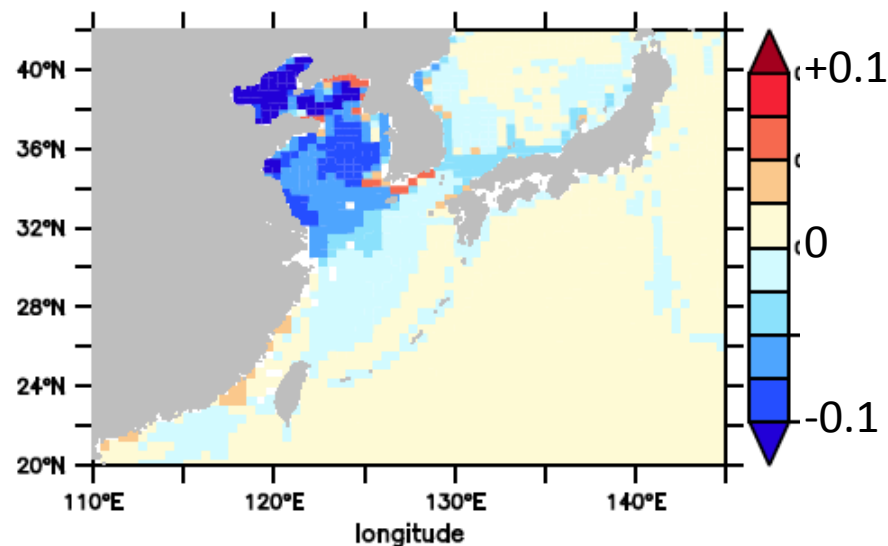
### (3) Rôle des autres facteurs de l'acidification - **apports continentaux**

#### ✦ **Amplification de l'acidification en zone côtière** – apports de nitrates / phosphates

Les apports de nutriments par les fleuves conduisent à une augmentation de la production biologique et à une exacerbation de l'acidification de fond – jusqu'à -0.1 unité pH en Mer de Chine Orientale



Production Phytoplanctonique  
(liée à l'apport fluvial de 1970 à 2000)



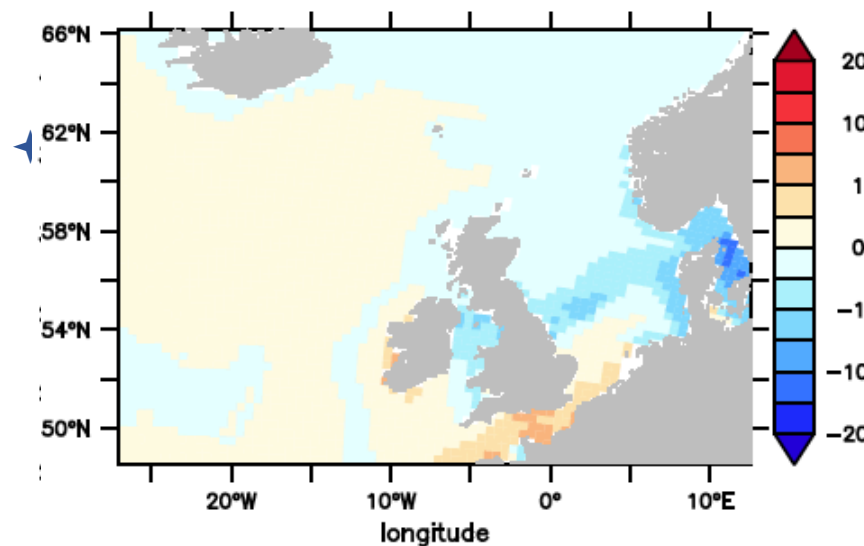
Acidification des eaux de fond  
(liée à l'apport fluvial de 1970 à 2000)

### (3) Rôle des autres facteurs de l'acidification - **apports continentaux**

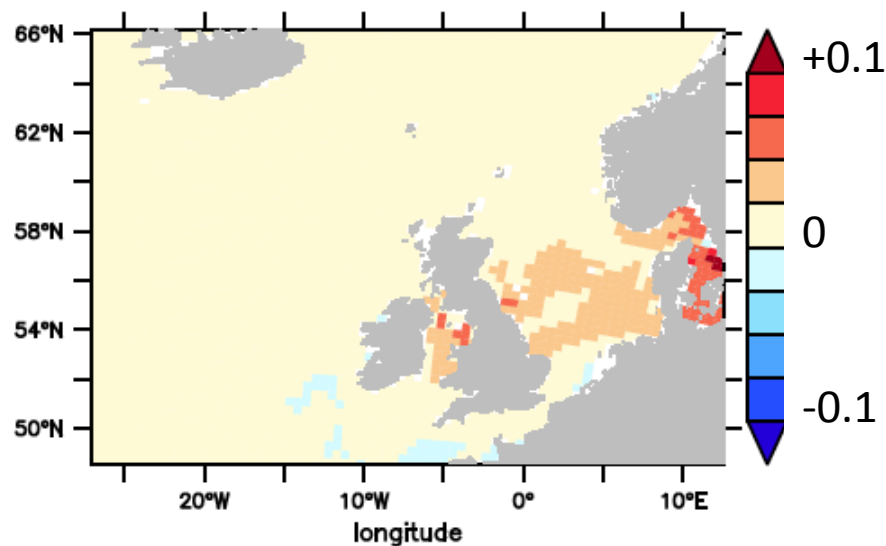
#### ✦ **Amplification de l'acidification en zone côtière** – apports de nitrates / phosphates

Effets modérés sur la façade Ouest Européenne  
Modélisation à plus haute résolution nécessaire.

North Sea



Production Phytoplanctonique  
(liée à l'apport fluvial de 1970 à 2000)



Acidification des eaux de fond  
(liée à l'apport fluvial de 1970 à 2000)

Quelques mot de conclusions

## **Projections / Régionalisation / Cartographie**

- Scénarios d'acidification et modélisation du Système Terre
- Focus sur certaines zones spécifiques (eg. Océan Arctique)
- Au service de la communauté étudiant les impacts de l'acidification
- Valorisation dans le rapport du GIEC (AR6 WG1)
- Outil de visualisation sur le web

***Un grand merci à : James Orr, Marion Gehlen, Patrick Brockman, Jorge Martinez-Rey, Jens Terhaar, Timothée Bourgeois, Lester Kwiatkowski, Olivier Torres, les groupes de modélisation du climat / CMIP, ...***



# Valorisations des résultats

Hopkins, F.E., et al. (2020). *Proceedings of the Royal Society* 476, 20190769.

Kwiatkowski, L., and Orr, J.C. (2018). *Nature Climate Change* 1.

**Kwiatkowski, L., Torres, O., Bopp, L., et al. (2020). *Biogeosciences* 17, 3439–3470.**

Terhaar, J., Orr, J.C., Gehlen, M., Ethé, C., and Bopp, L. (2019). *Biogeosciences* 1–36.

**Terhaar, J., Orr, J.C., Ethé, C., Regnier, P., and Bopp, L. (2019). *Global Biogeochemical Cycles* 33, 1048–1070.**

Terhaar, J., Tanhua, T., Stöven, T., Orr, J.C., and Bopp, L. (2020a). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2020JC016124.

**Terhaar, J., Kwiatkowski, L., and Bopp, L. (2020b). *Nature* 582, 379–383.**

Terhaar, J., Lauerwald, R., Regnier, P., Gruber, N., and Bopp, L. (2021). *Nature Communications* 12, 169.

Torres, O., Kwiatkowski, L., Sutton, A.J., Dorey, N., and Orr, J.C. (2021). *Geophysical Research Letters* 48, e2020GL090228.

## Dans le dernier rapport du GIEC (AR6 WGI)

Contributing Authors (Chapter 5) : L. Bopp , L. Kwiatkowski, J. Terhaar

**Plusieurs publications utilisées / référencées**

