

Acidification des océan : l'autre problème du CO₂

James Orr

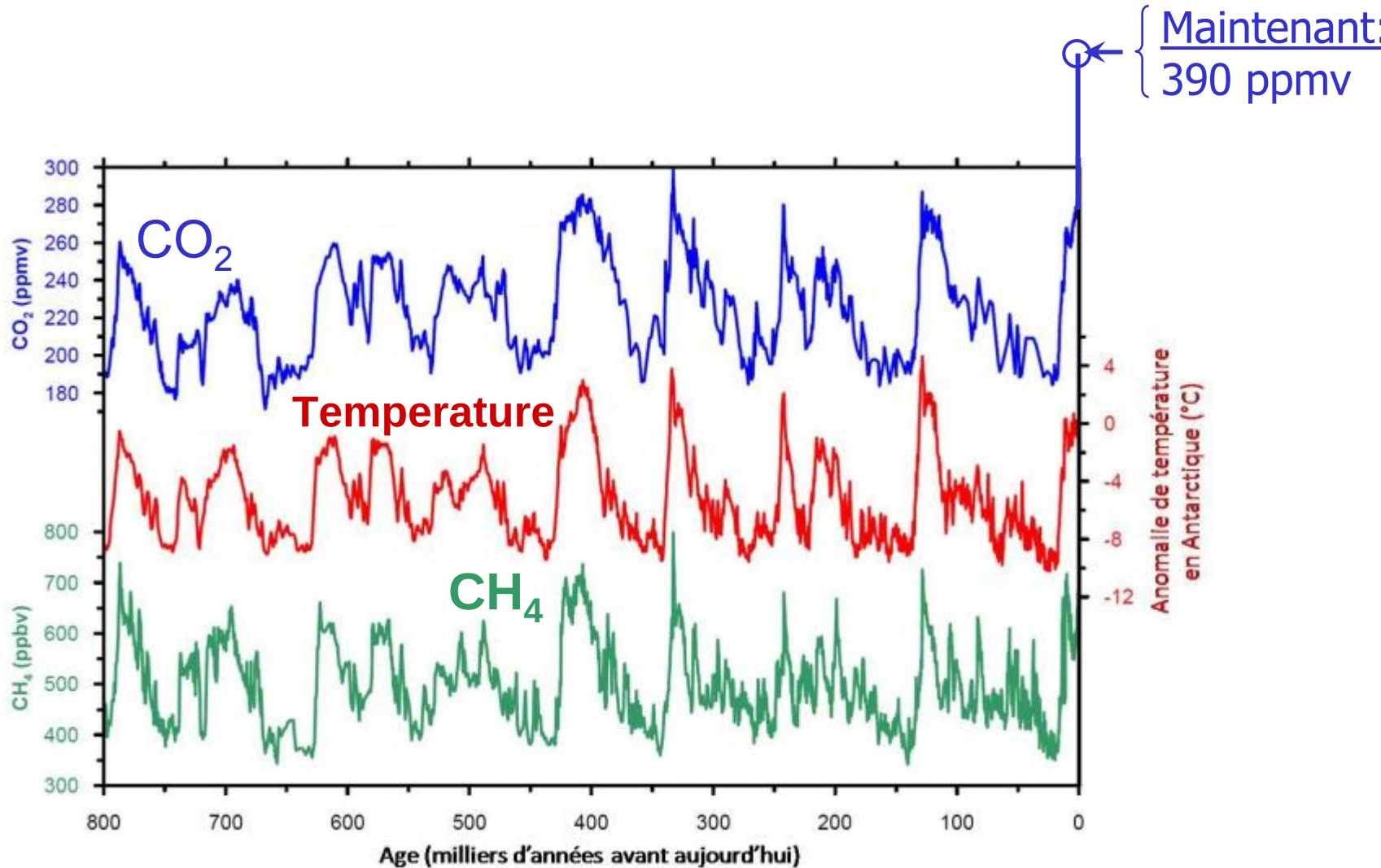
Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), CEA-CNRS-UVSQ
Gif-sur-Yvette, France*

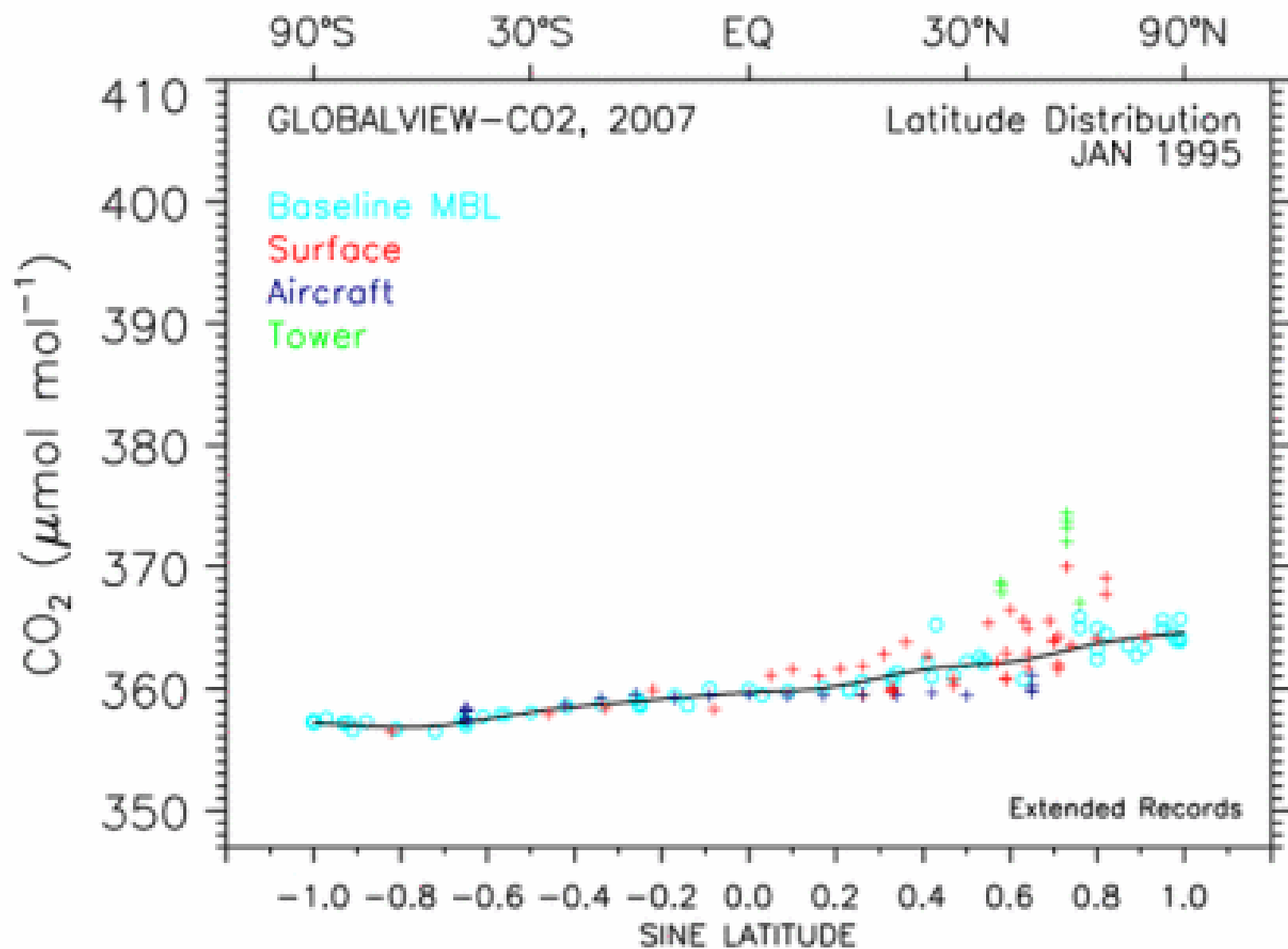


*European Project on
Ocean Acidification*

CO₂ atmosphérique : dernières 800 000 années



Luthi et al. (2008, Nature)

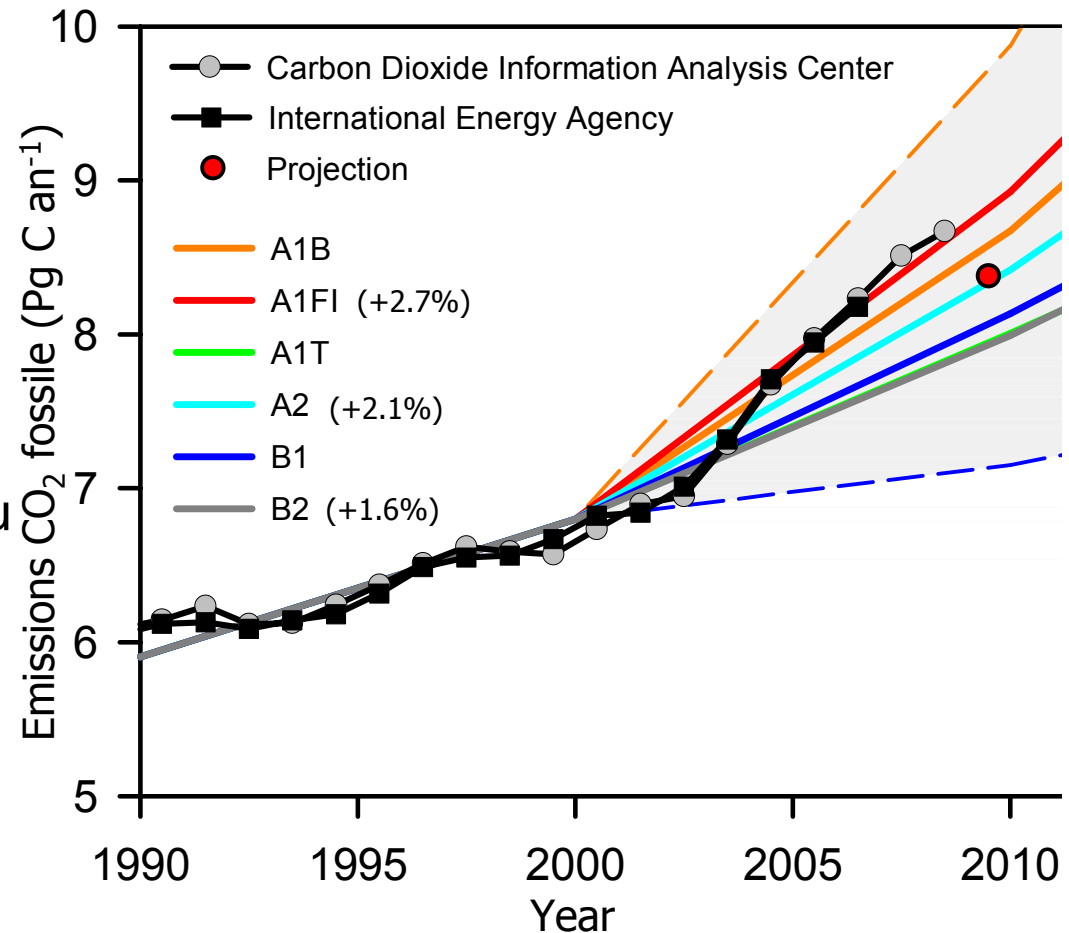


Les émissions récentes sont pire que les projections

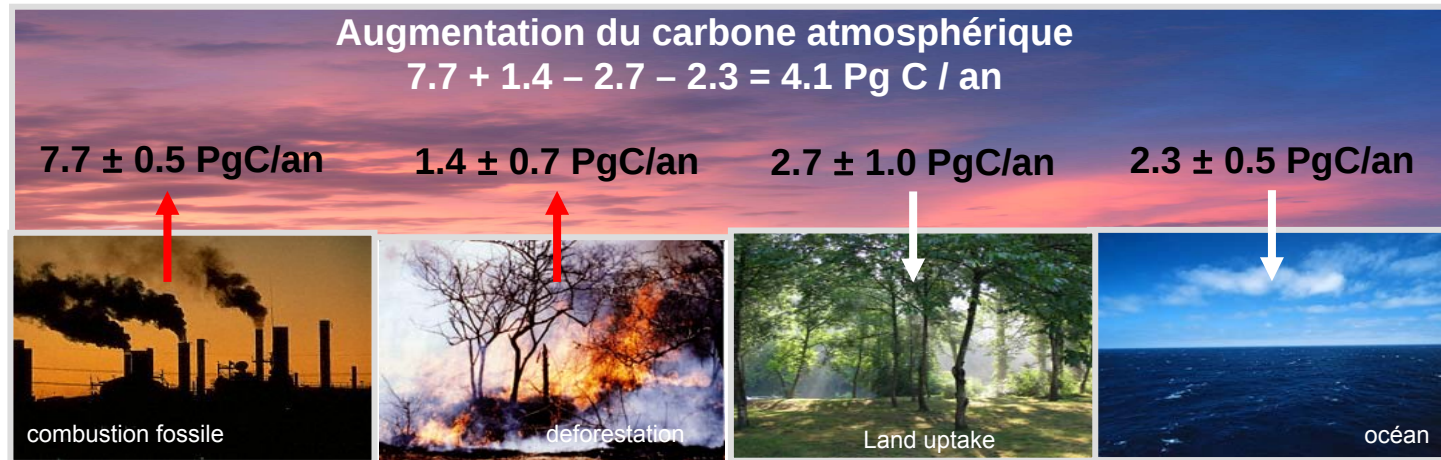
- émissions CO₂ anthropique
 - +2.0% en 2008
 - +3.4% par an 2000-2007
 - +1.0% par an 1990-1999
 - +2.0% par an depuis 1850
- accroissement pire que prévu
- baisse récente provisoire



Projection **2009**
Emissions: -2.8%
PNB: -1.1%
C intensité: -1.7%



Budget contemporain de carbone (2000-2008)



Global Carbon Project (2009)

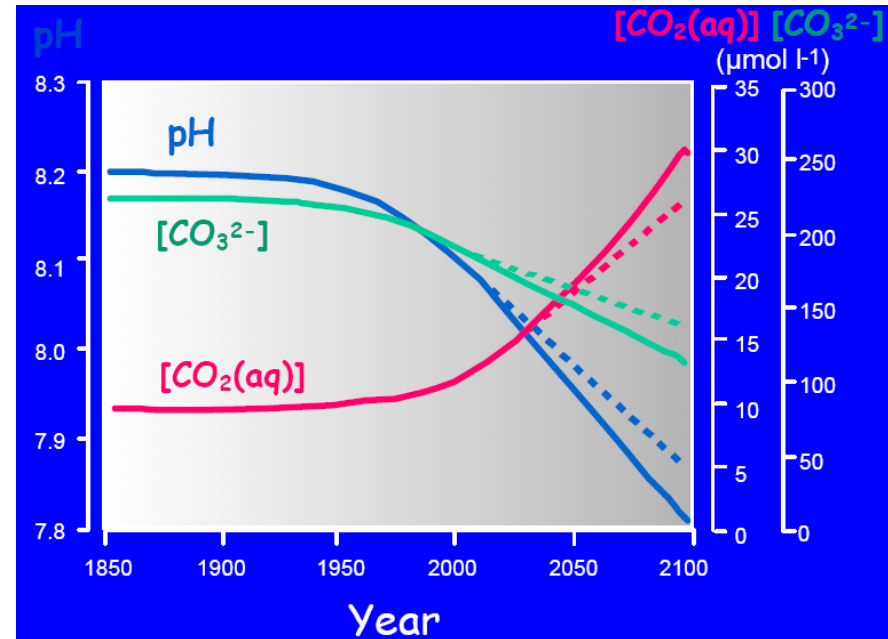
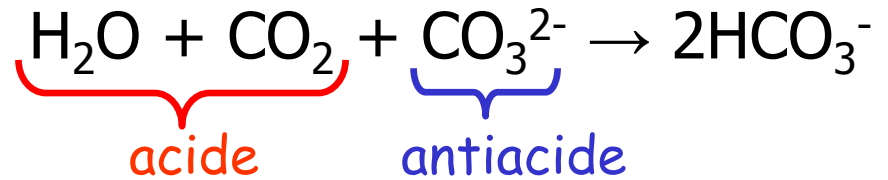
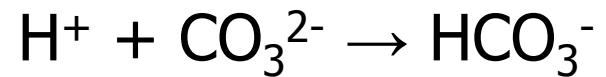
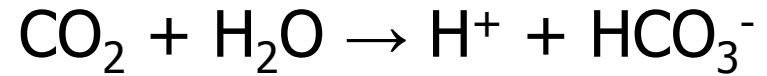
~1/2 des émissions anthropiques reste dans l'atmosphère

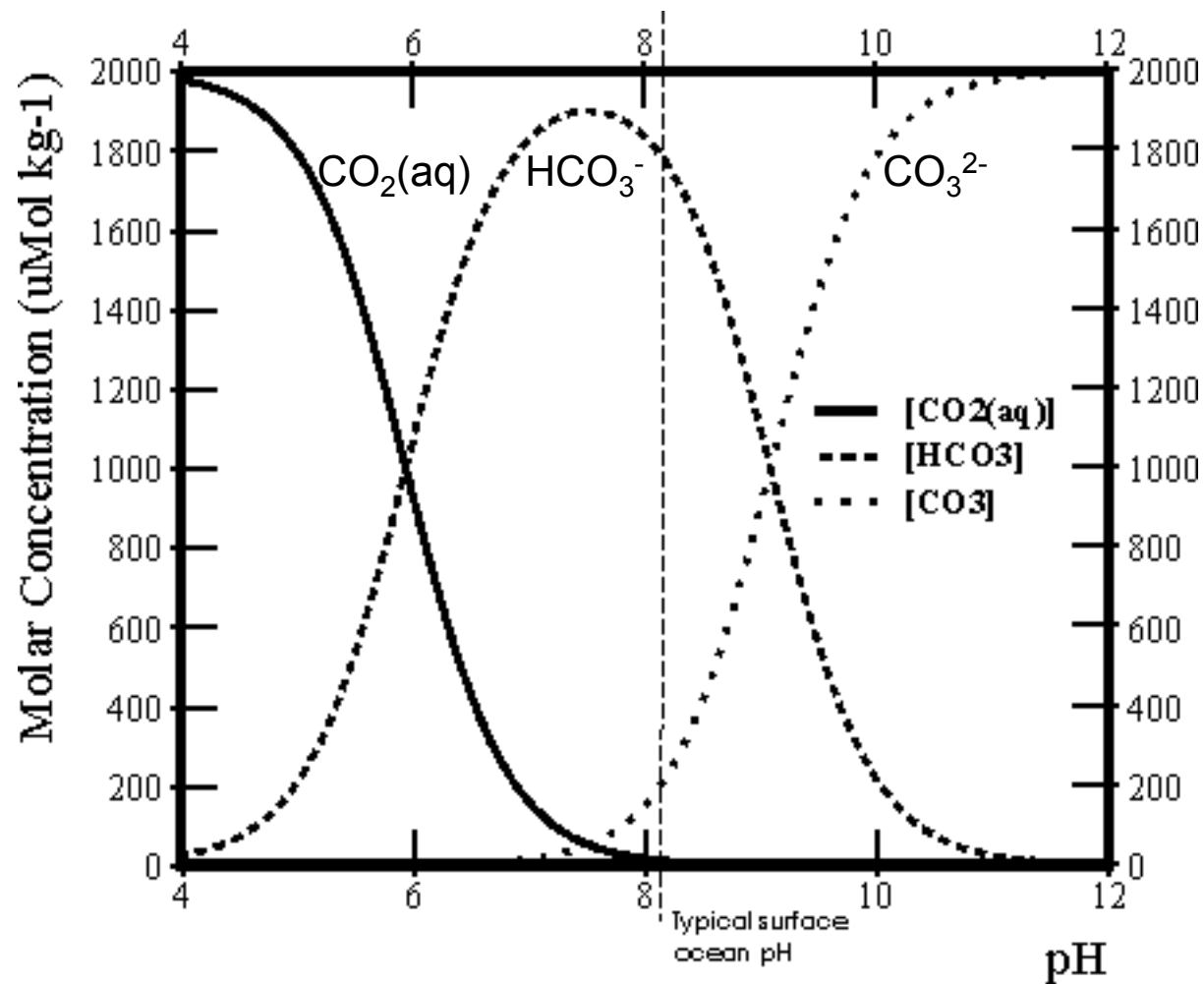
~1/2 est absorbée par l'océan + la biosphère terrestre

$\Delta\text{CO}_2 \text{ atm} = \text{émissions} - \text{absorption (océan + terre)}$

Acidification des océans

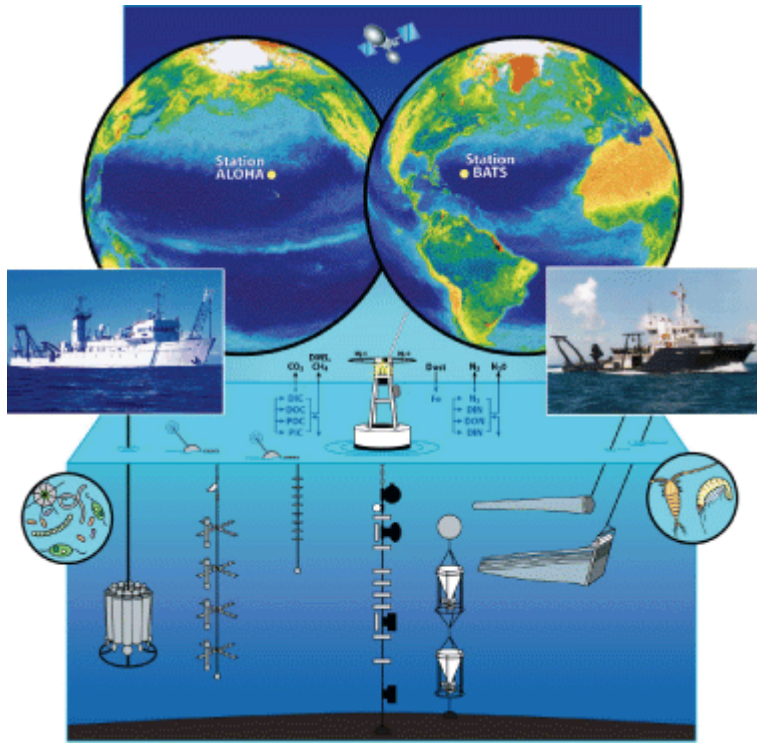
- l'océan absorbe $\frac{1}{4}$ du CO_2 anthropique émis dans l'atmosphère
- le CO_2 est un gaz acide
- l'acidité de l'océan +30% depuis le début de l'ère industrielle





Dissolved Carbon Partitioning vs. pH

Réduction du pH de l'océan déjà mesurable



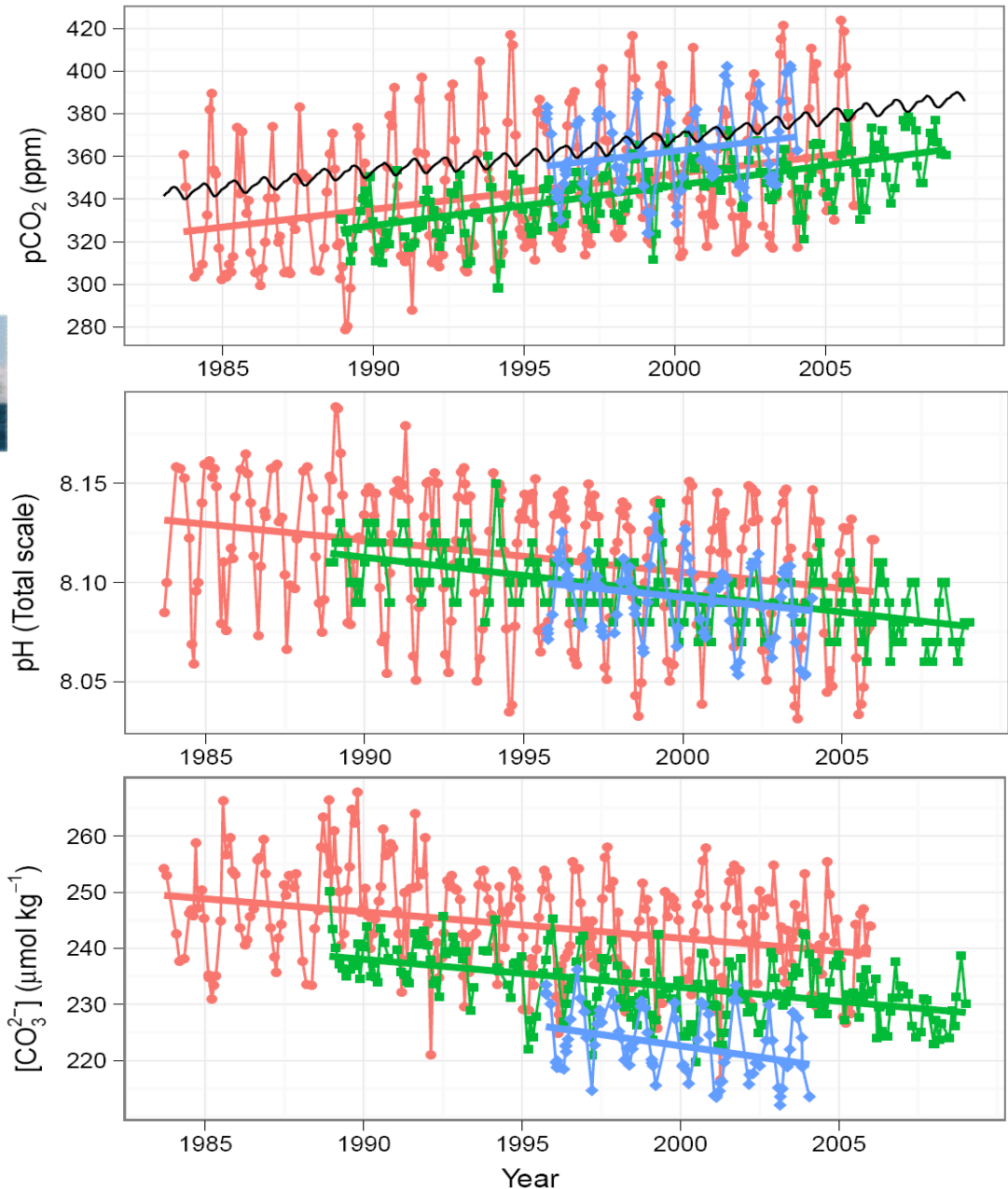
Données :

Bates (2007),

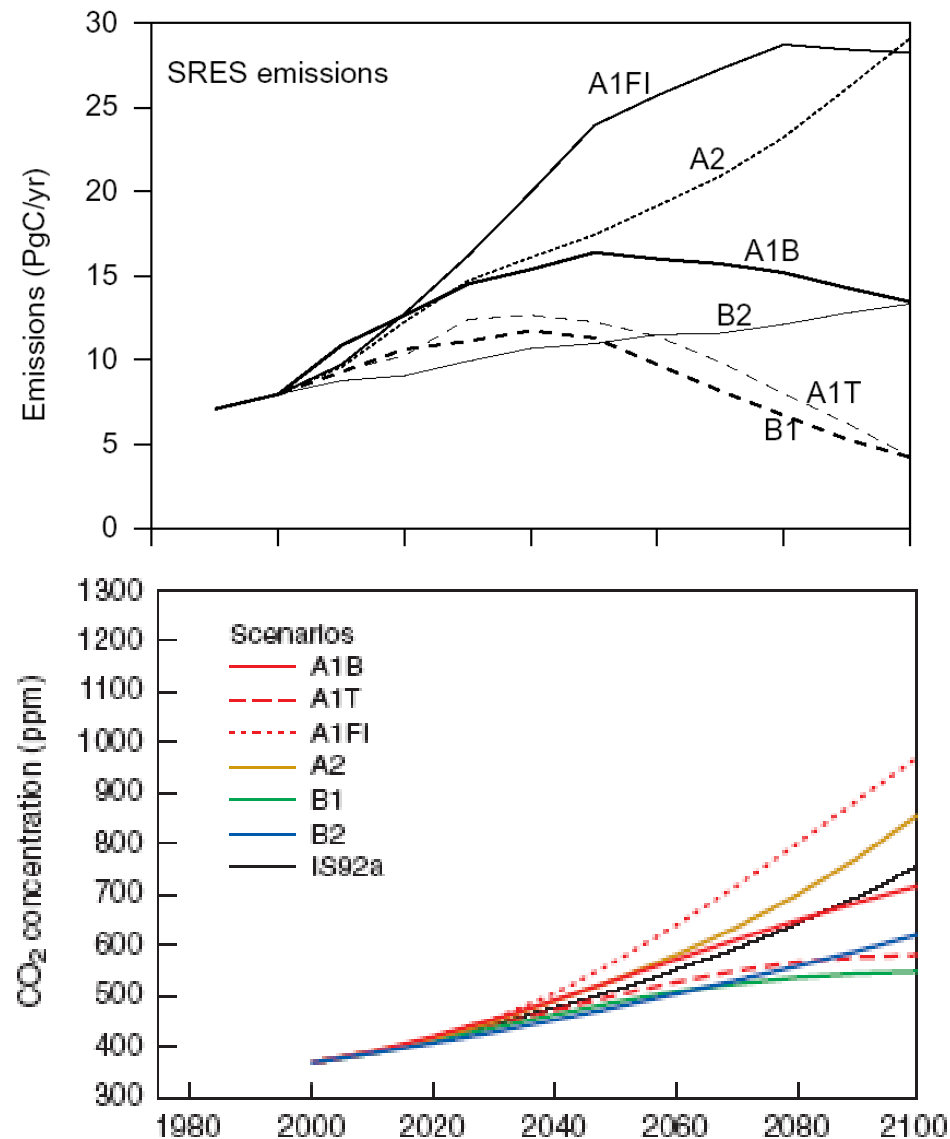
Dore et al. (2009),

Santana-Casiano et al. (2007),

Gonzàles-Dàvila et al. (2010)

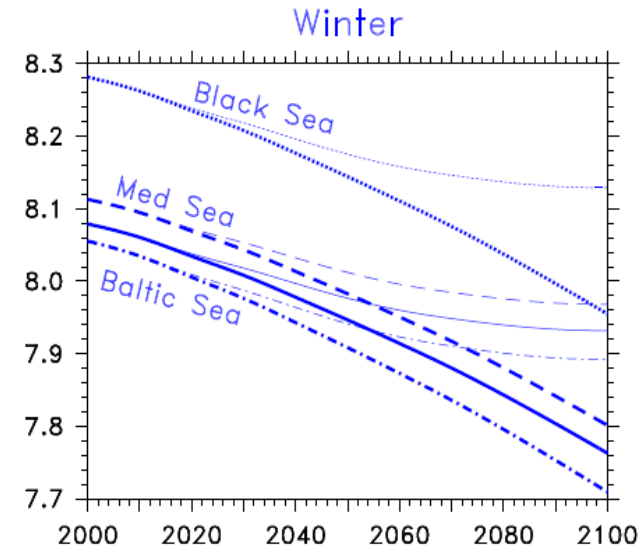
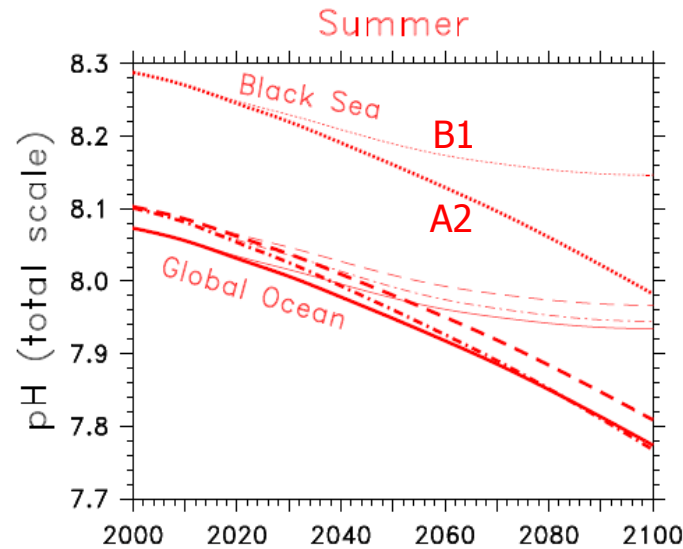


Future SRES emission scenarios from the IPCC ... and resulting atmospheric CO₂

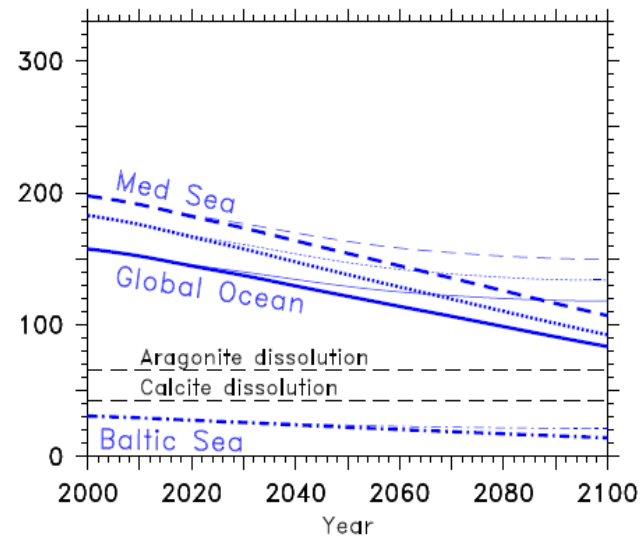
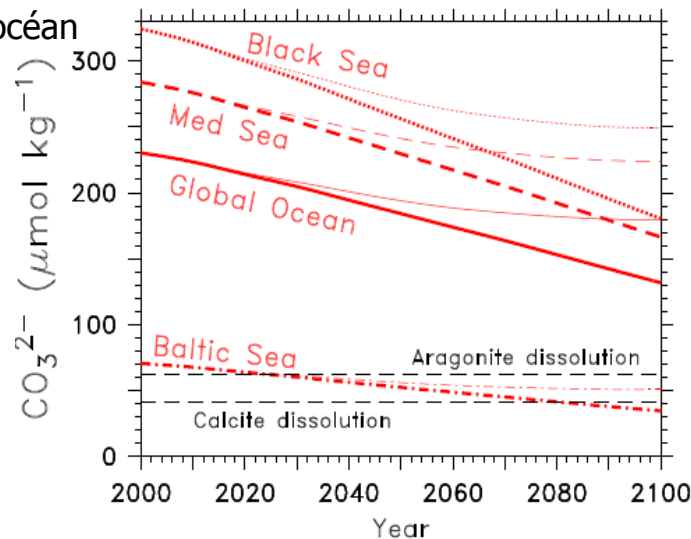


Changements futurs : calculs simples

$$\Delta \text{pH}_{\text{med}} \approx \Delta \text{pH}_{\text{ocean}}$$



$$\Delta [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{med}} > \Delta [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{ocean}}$$



*Equilibrium calculations with characteristic T, S, Alk & atm pCO_2

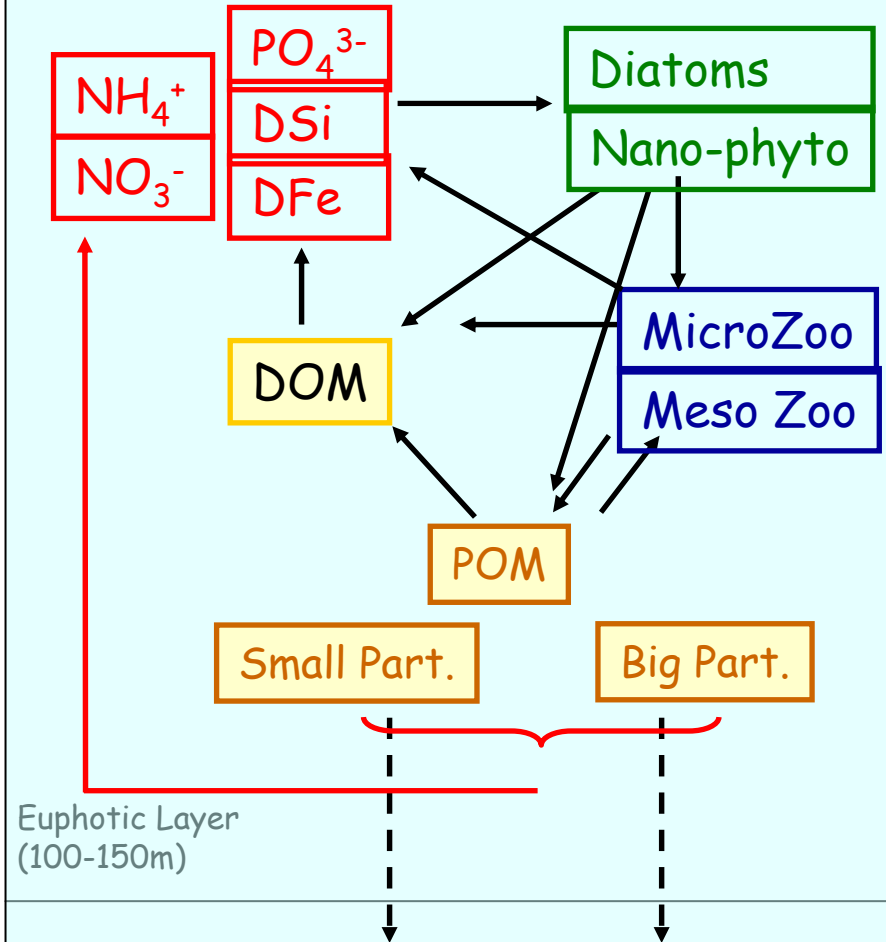
Models:

Coupled climate model: IPSL/CM4.1

- Atmosphere: LMD
- Ocean: OPA/ORCA-LIM Model
 - Resolution: 2° nominal ($\frac{1}{2}^\circ$ tropics)
 - Isopycnal Diffusion & GM
 - TKE Model (prognostic K_z)
 - Sea ice model (LIM)



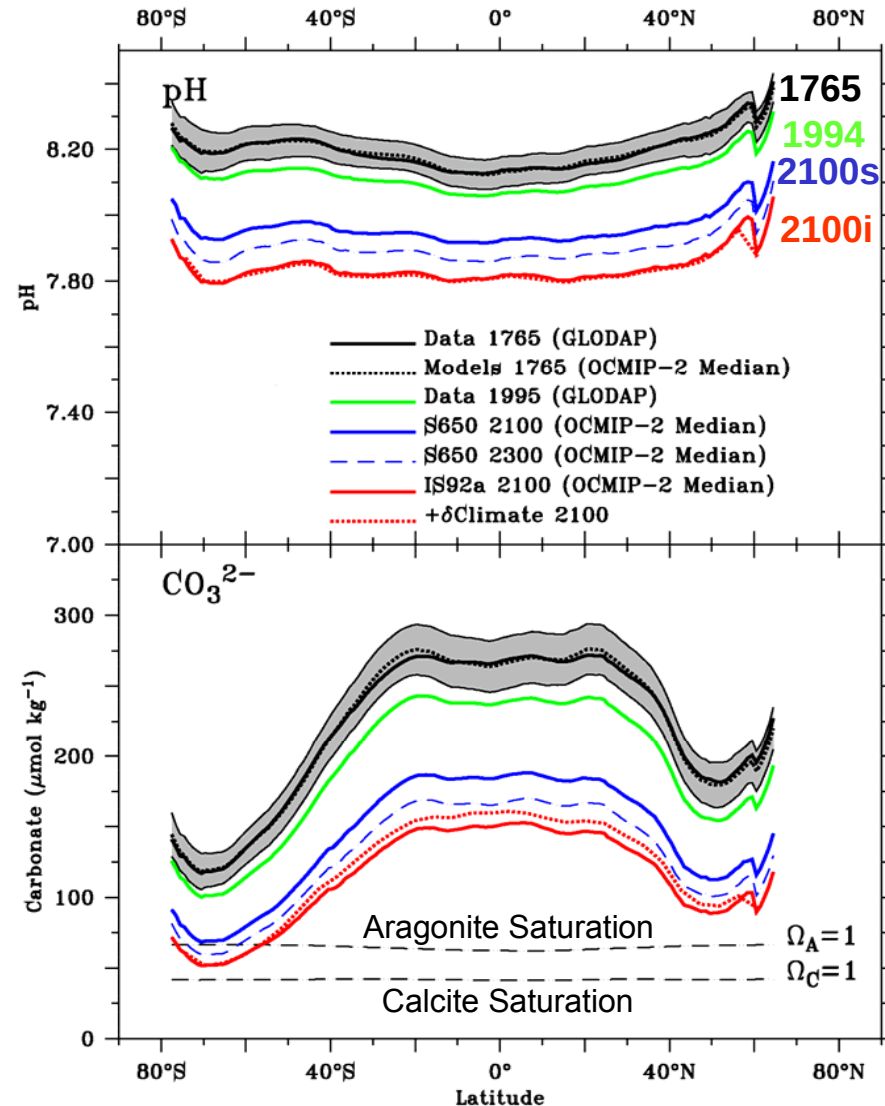
BGC model: PISCES



Aumont & Bopp (2006)

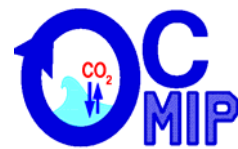
Grandes réductions de pH et $[\text{CO}_3^{2-}]$ en surface

- réductions de pH
-0.3 à -0.4 avant 2100
plus de $[\text{H}^+]$ (100-150%)
- Réduction de $[\text{CO}_3^{2-}]$
= sous-saturation ($\Omega_A < 1$)
dans l'océan austral
(jusqu'à $55 \pm 5 \mu\text{mol/kg}$ en
2100, IS92a)

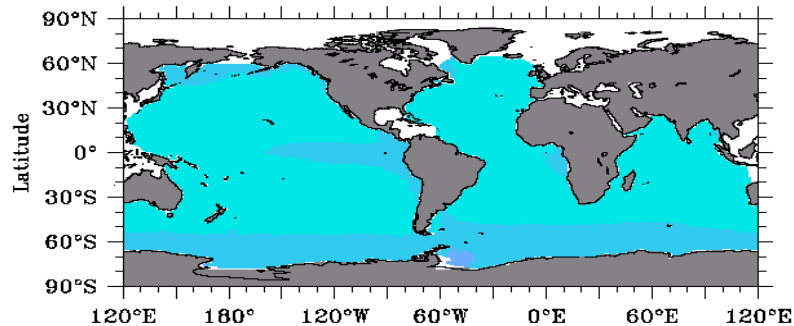


Orr et al. 2005 (Nature)

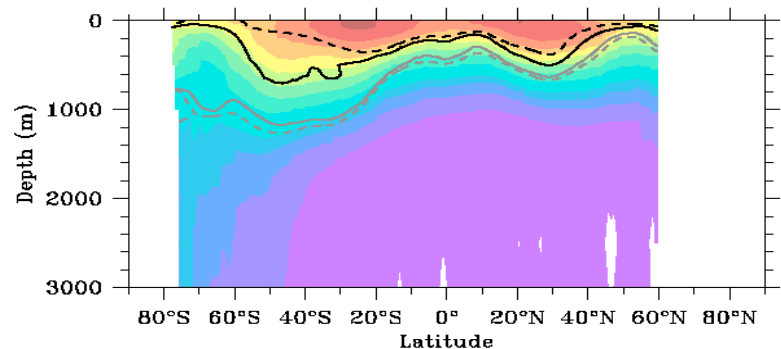
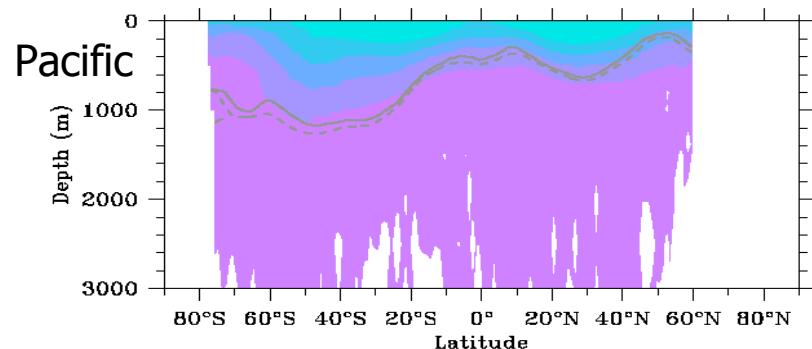
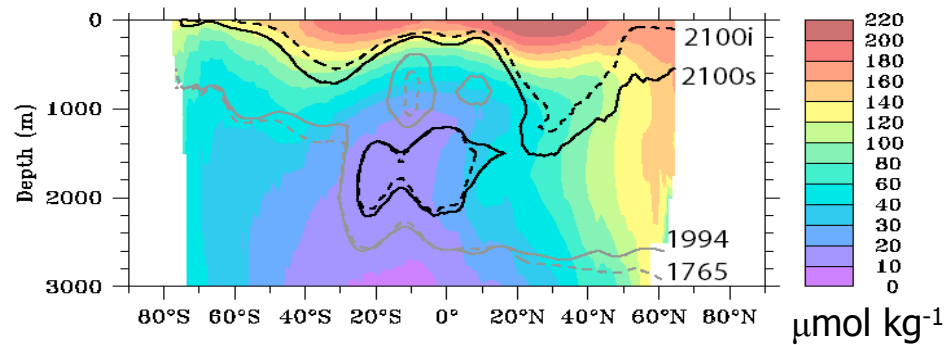
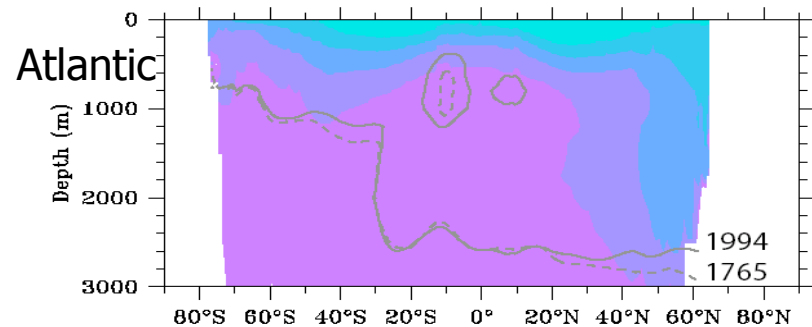
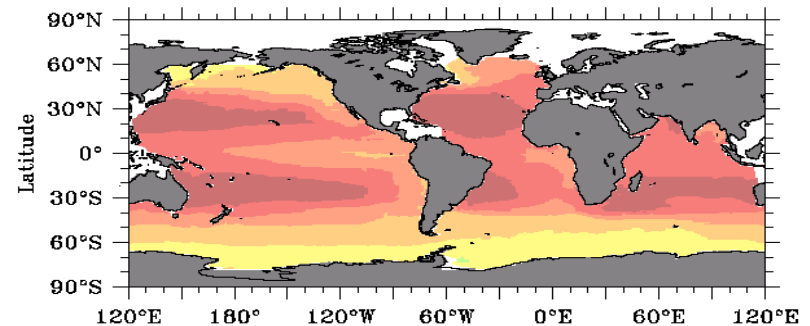
Le CO₂ anthropique *augmente* et *pénètre* dans l'océan profond



1994

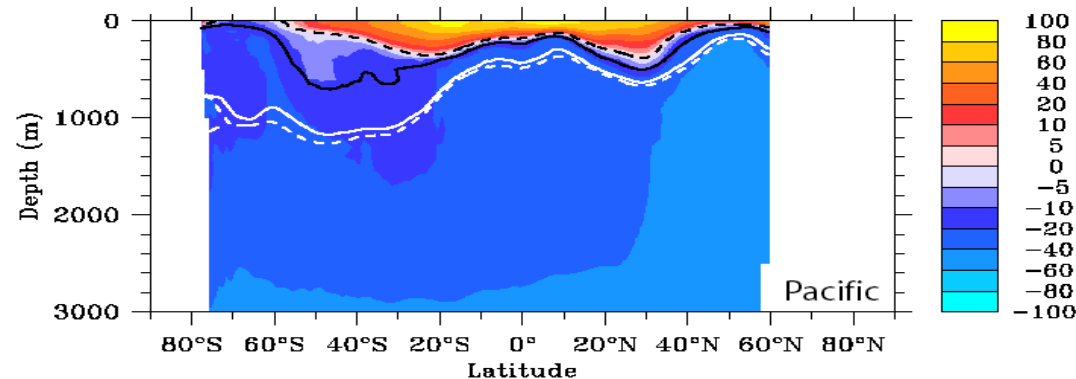
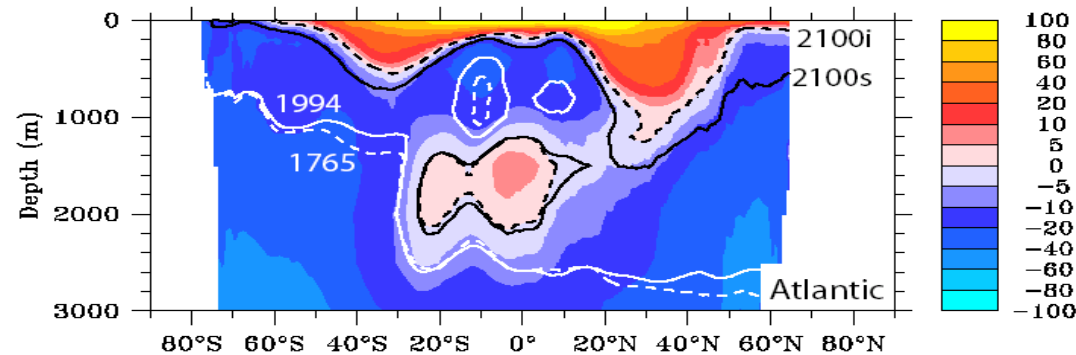
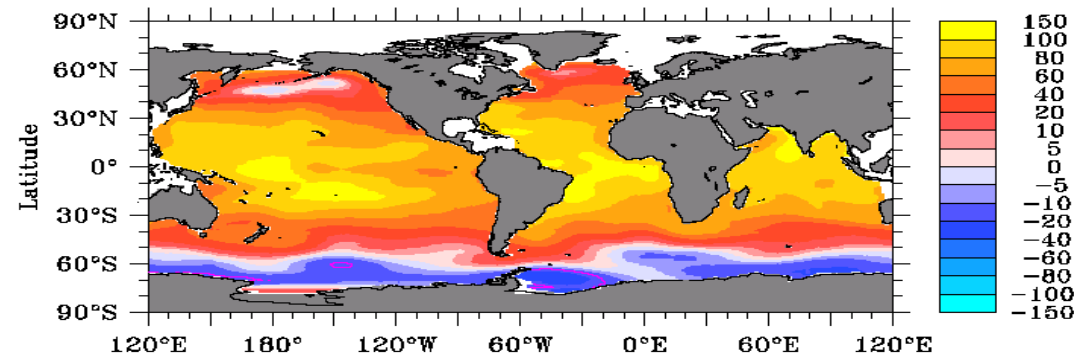


2100 (IS92a scenario)

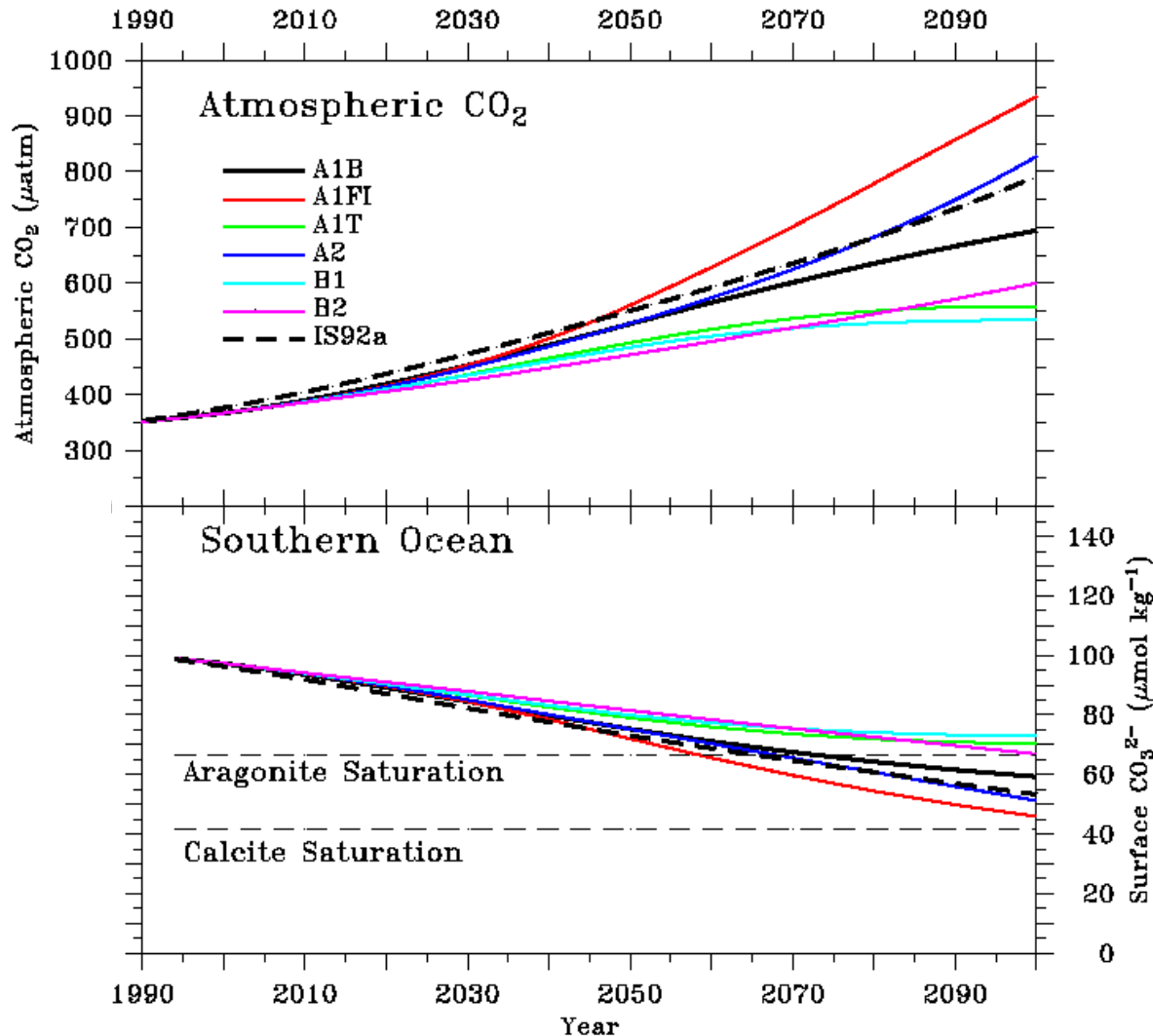


En 2100... grands changements de l'état de saturation en sous-surface ($\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$) [$\mu\text{mol kg}^{-1}$]

- Sous-saturation en surface ($\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A < 0$)
 - Océan Austral
 - Pacifique subarctique
- Remontée de l'horizon de saturation d'aragonite (i.e., $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A = 0$)
 - Océan Austral (vers ~1000 m)
 - Atlantique nord (vers ~3000 m)



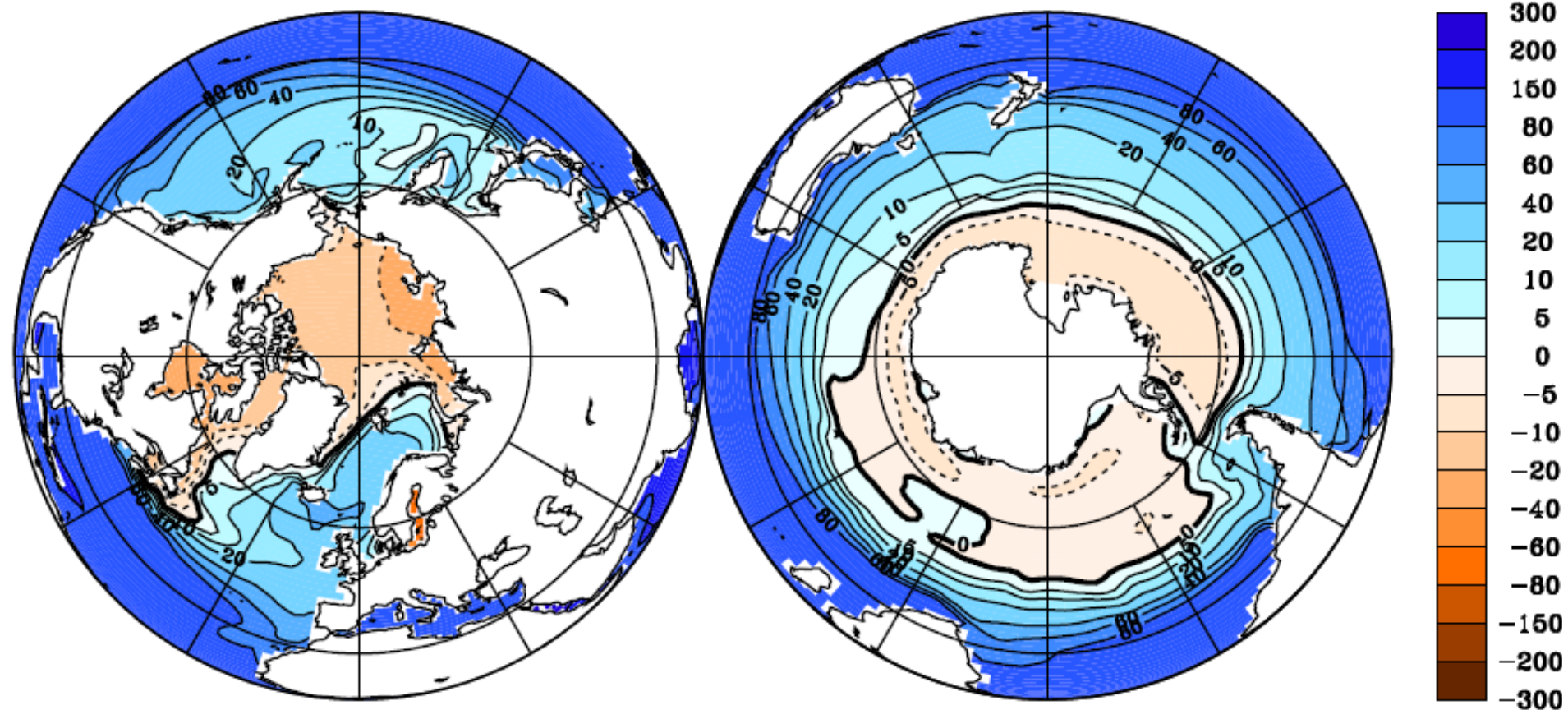
Incertitude liée aux émissions (scénarios IPCC : IS92a et SRES scénarios)



*modèle de Bern (complexité réduite) de G.-K Plattner et F. Joos

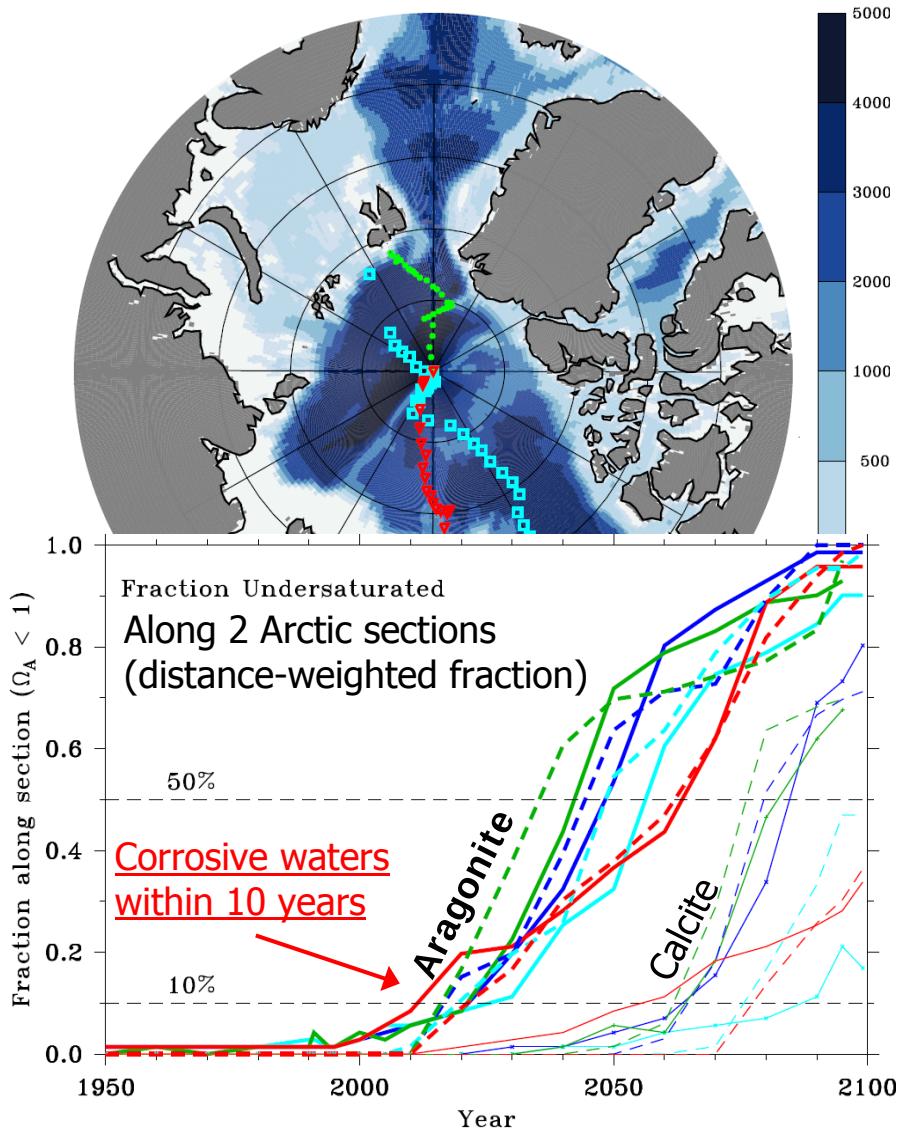
Undersaturation is strongest in the Arctic

Aragonite undersaturation $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{Arag}}$ at $2\times\text{CO}_2$

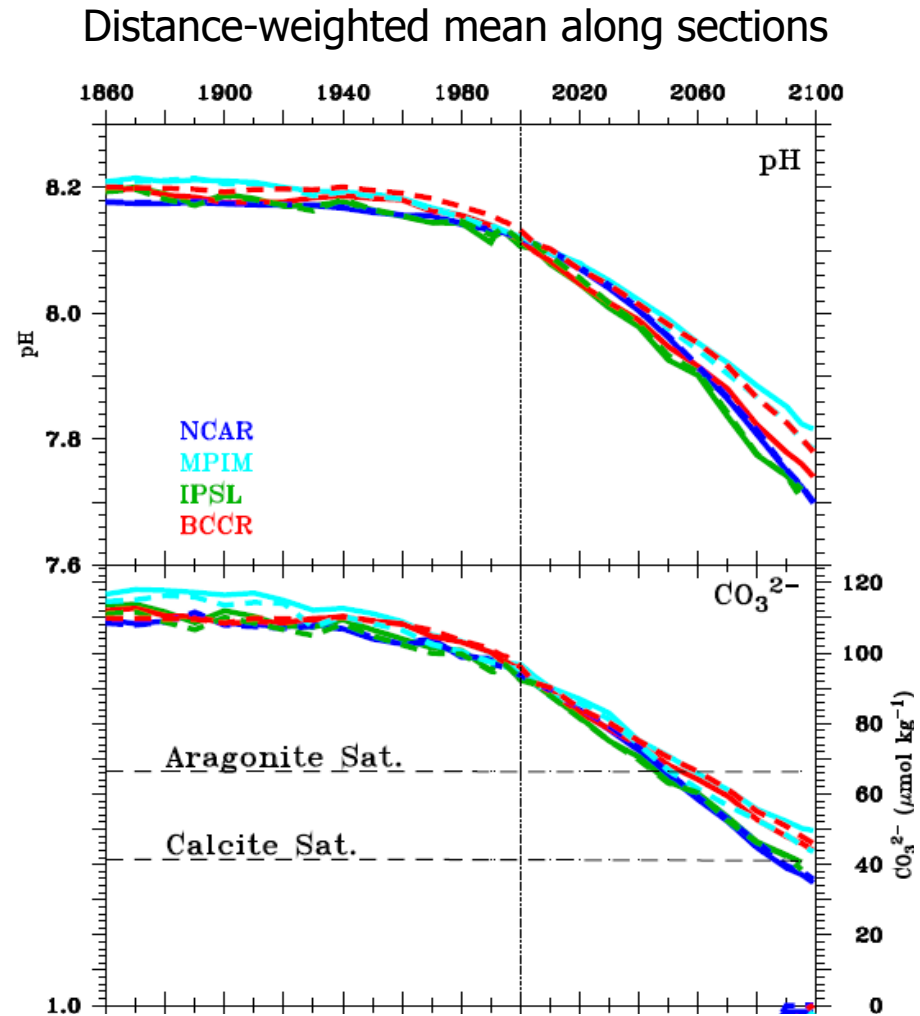


*Model approach (model results only, scenario: +1% annual increase)

Projections améliorées par correction des biais modernes (4 modèles de système terre)



Projected undersaturation along Beringia section (A2 scenario)



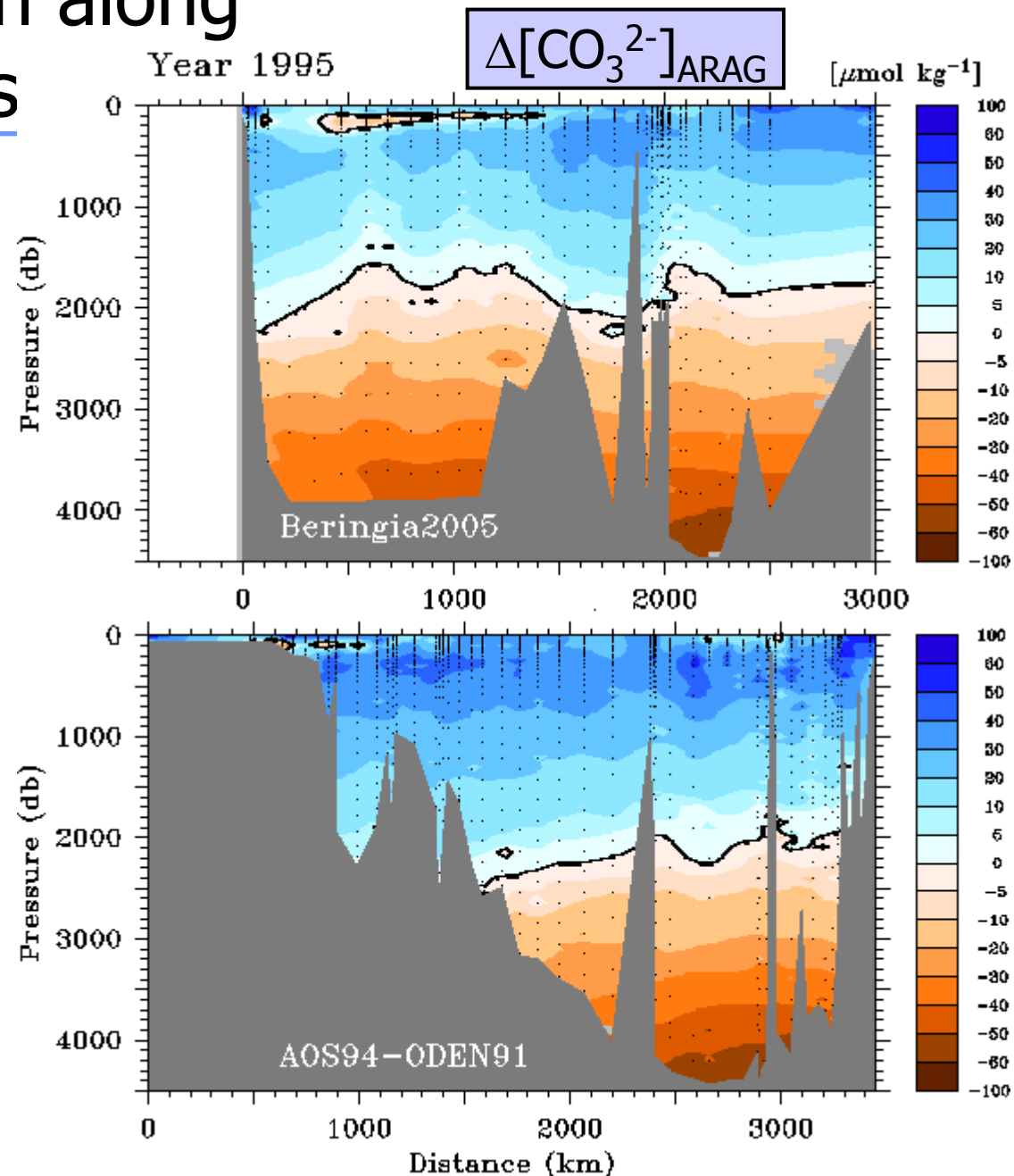
Past, Present, & Projected changes in Arctic CaCO₃ saturation **in summer**:

- Preindustrial - Surface and near subsurface waters supersaturated w.r.t. aragonite and calcite
- Now - Near-subsurface waters in Canada Basin have become undersaturated w.r.t. aragonite, due to anthropogenic CO₂ increase
- In 10 years
 - 10% of surface waters undersaturated w.r.t. aragonite
 - near-subsurface waters undersaturated w.r.t calcite
- In 40 years – average surface waters undersaturated w.r.t. aragonite
- In 50 years – 10% surface waters undersaturated w.r.t. calcite
- In 70 years – 50% surface waters undersaturated w.r.t. calcite

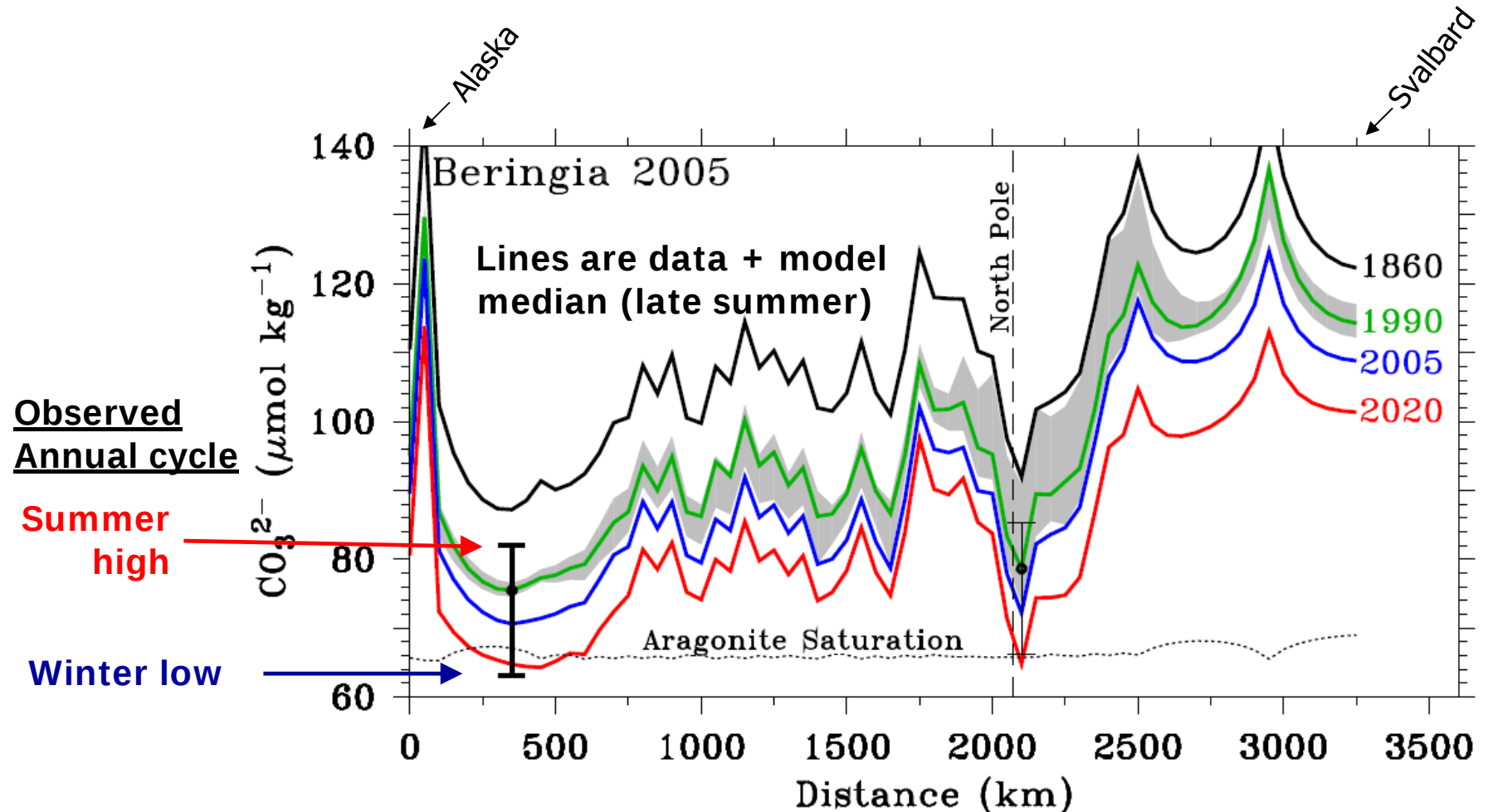
Aragonite Saturation along trans-Arctic sections

*Data-Model approach

- Future $[\text{CO}_3^{2-}]$ computed on section after adding model perturbations to data: DIC, Alk, T, S, SiO_2 , & PO_4^{3-}
(Historical + SRES A2)
- Deep saturation horizons resist change
- Undersaturation invades from surface
 - Aragonite: surface undersat. by 2050



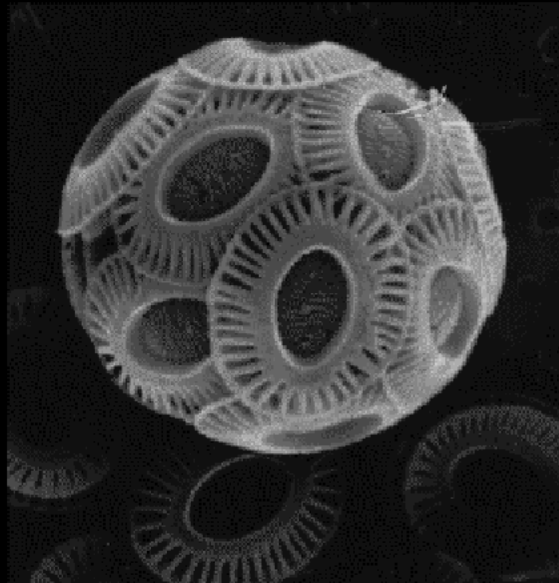
In winter, Chukchi Sea surface waters already undersaturated by 1990



*Amplitude (annual cycle) > 30 years of current anthropogenic transient

Coccolithophores

calcite



T. Tyrrel

Calcareous algae

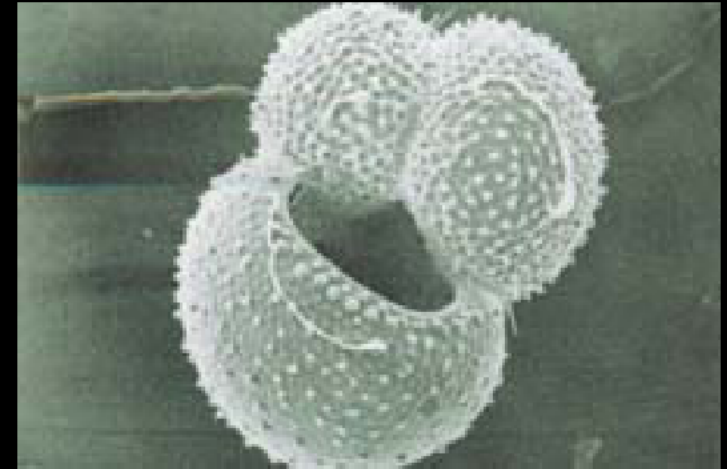
High-Mg
calcite



Nancy Sefton

Forams

calcite



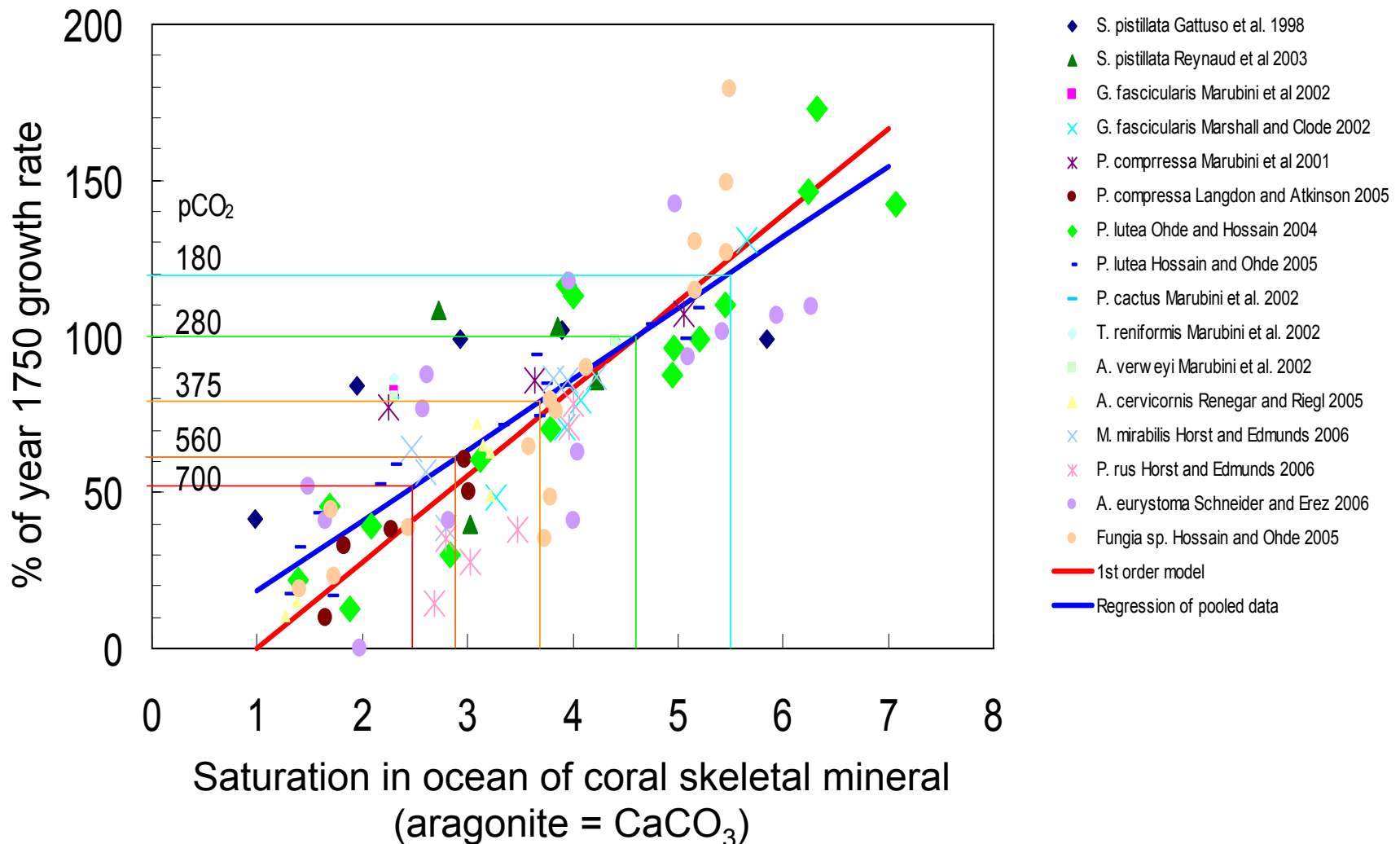
Corals

aragonite



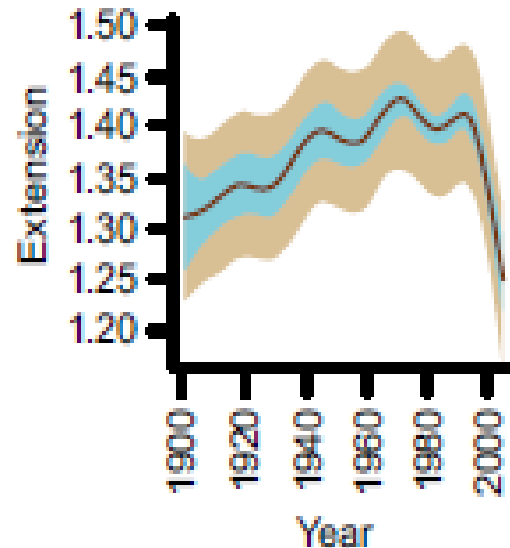
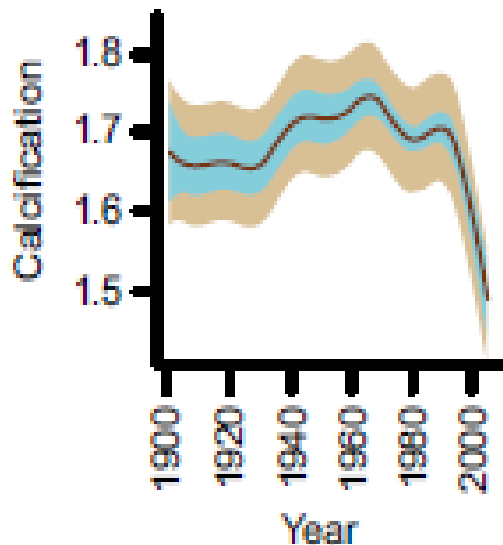
NOAA

Coral skeletons grow more slowly at higher CO₂ levels



Decline in GBR coral growth since 1990

- 328 Massive *Porites* coral colonies (on 69 reefs)
- Reductions 1990-2005
 - 14% calcification
 - 13% linear growth



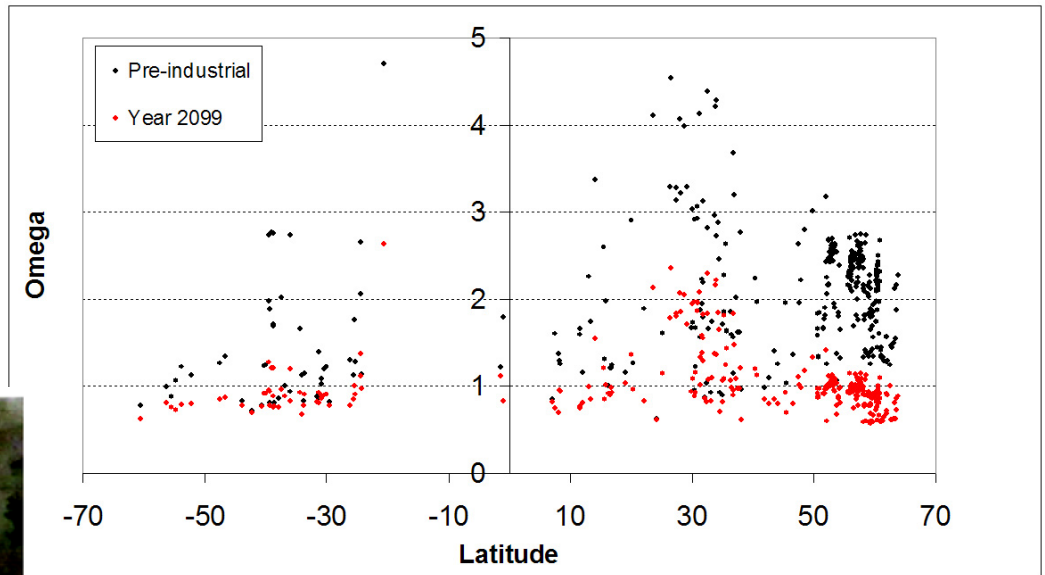
- Most probable causes:
 - warming
 - acidification

De'ath et al. (2009) Science

Most cold-water corals exposed to corrosive waters by 2100 (IS92a scenario)

Stony Cold-water corals:

- 2005 : 95% with $\Omega_A > 1$
- 2100 : 35% with $\Omega_A > 1$



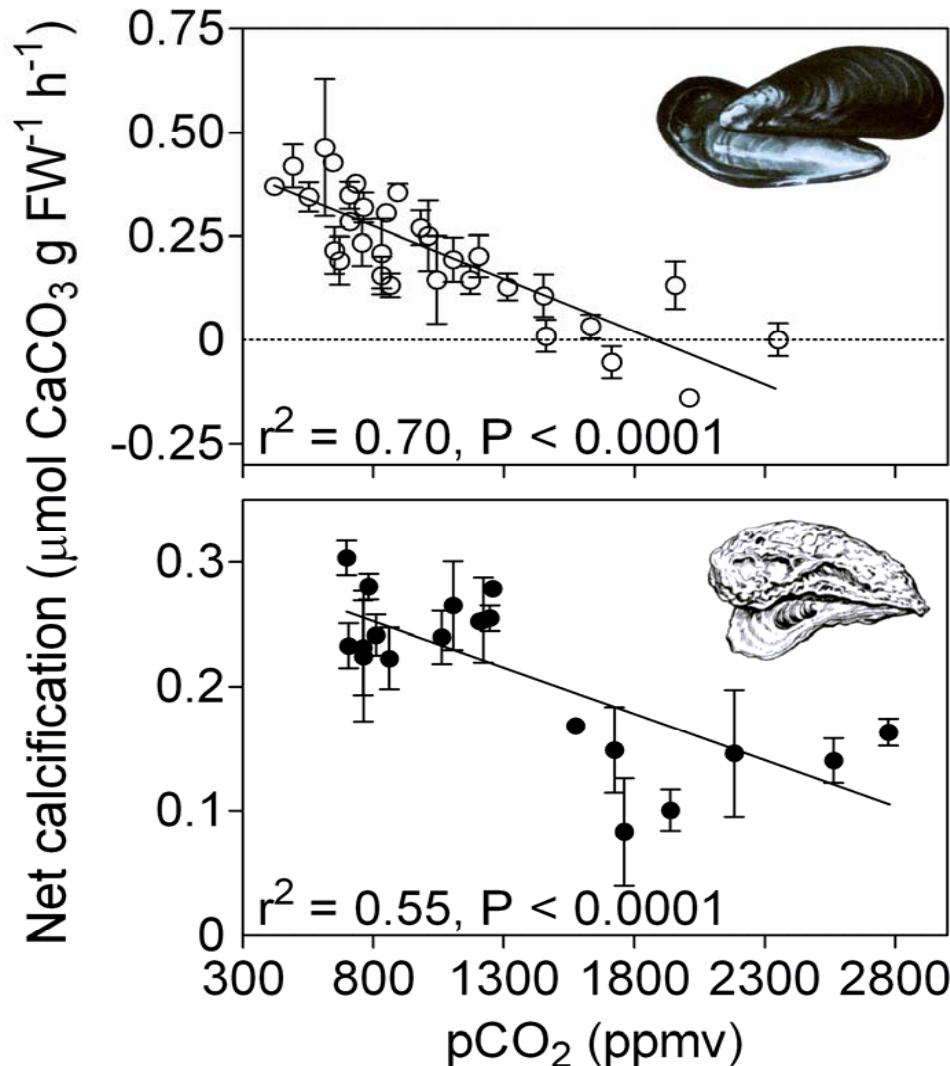
Guinotte et al. (2006, Frontiers in Ecol. Env)



Lophelia pertusa

L. pertusa with expanded tentacles ready to capture zooplankton

Mussels & oysters calcify less at higher CO₂



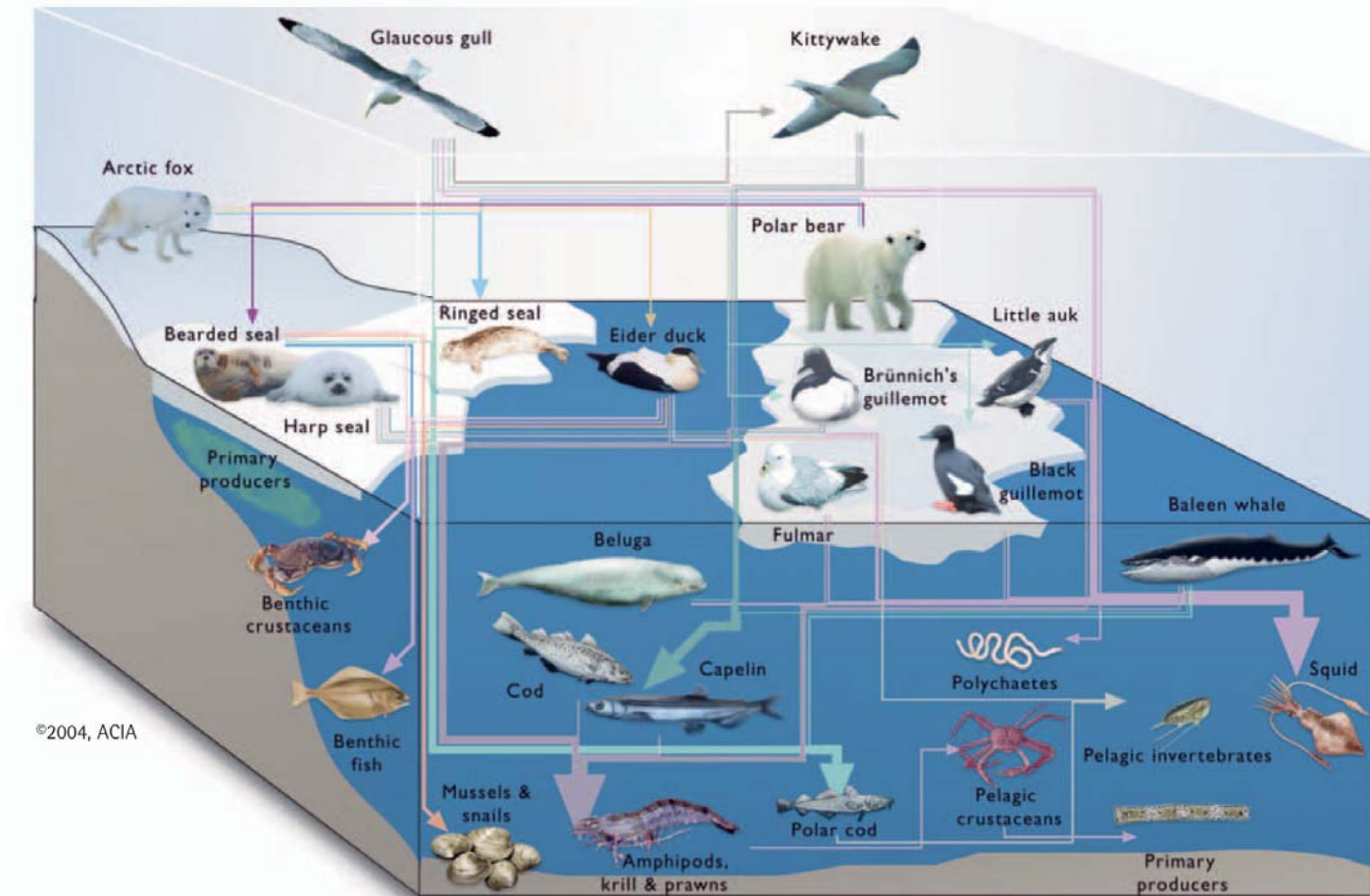
Decrease in calcification rates for the 2 species: *Mytilus edulis* & *Crassostrea gigas*

- Significant with $p\text{CO}_2$ increase and $[\text{CO}_3^{2-}]$ decrease

At $p\text{CO}_2$ 740 ppmv:

- 25% decrease in calcification for mussels
- 10% decrease in calcification for oysters

Prominent role of shellfish in Arctic marine food web



Marine food web in the Beaufort Sea

Effects on other other Arctic animals?



Limacina helicina
(dominant polar pteropod)

- Macro-Zooplankton
- Abundant food source for marine predators
- Integral component of food webs
- Pteropod populations highest in cold waters (reaching 10,000 / m³)
- Ross Sea
 - *L. helicina* sometimes dominates over krill
 - Indicator of ecosystem health
 - Dominant exporter of organic & inorganic C



Photo credit: Russ Hopcroft, NOAA

Photos: *David Liittschwager*



Jour 0

Lab experiment by Prof. *Victoria Fabry* using Southern Ocean conditions projected for year 2100 from Orr et al. (2005, Nature)



Jour 2



Jour 16

Monaco Declaration urges policymakers to take action on

Ocean acidification:

- is ongoing
- is already detectable
- is accelerating & severe damages are imminent
- will have socioeconomic impacts
- is rapid, but recovery will be slow
- can be controlled only by limiting future atmospheric CO₂ levels

→ Signed by 155 ocean scientists from 26 countries



**SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON THE OCEAN IN A HIGH-CO₂ WORLD**
MONACO - OCTOBER 6-9, 2008



Monaco Declaration



It was while taking part in the working sessions of the scientific community, which met in Monaco last October for the second international symposium *The Ocean in a High-CO₂ World*, that I expressed my earnest wishes for the *Monaco Declaration* to be drafted. The seas and oceans are a source of life and the carbon dioxide emitted to the atmosphere from human activities, which in turn is driving their acidification at a rate that is unprecedented.

This chemical modification will alter marine ecosystems, upon which over half of the world's population depends for its primary source of food. This declaration, based on irrefutable scientific findings and signed by 155 scientists from 26 nations, sets forth recommendations, calling for policymakers to address this immense problem.

I strongly support this declaration, which is in full accord with my efforts and those of my Foundation to alleviate climate change. I hope that it will be heard by all the political leaders meeting in Copenhagen in December 2009.

H.S.H. Prince Albert II



<http://www.ocean-acidification.net>

FAQ sur l'acidification des océans

CONTENU :

Le terme «acidification des océans»	1-2
Chimie du carbone et du pH océanique	2-3
Mesures et observations	4
Effet tampon géologique	5
Acidification des océans et calcification	5-6
Acidification des océans et photosynthèse	7
Individus et écosystèmes	7-9
L'acidification des océans dans l'histoire géologique	10
Méthodes Scientifiques	11
Géo-ingénierie et atténuation	12
Développement de la réglementation et prise de décisions	13-14
Contributeurs	14

Introduction

L'acidification des océans est un nouveau domaine de recherche dans lequel la plupart des études ont été publiées au cours des 10 dernières années. Par conséquent, il y a quelques certitudes, mais de nombreuses questions demeurent. L'acidification des océans est aussi un domaine de recherche multidisciplinaire qui comprend des sciences telles que la chimie, la paléontologie, la biologie, l'écologie, la biogéochimie, la modélisation et les sciences sociales. En outre, certains aspects de la recherche sur l'acidification des océans, comme la chimie des carbonates par exemple, sont complexes et peu intuitives. Pour ces raisons, les médias et le grand public trouvent certaines questions scientifiques ou résultats confus.

Le programme américain Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB; www.us-ocb.org), soutenu par le projet européen sur l'acidification des océans (EPOCA; <http://www.epoca-project.eu/>) et le programme anglais de recherche sur l'acidification des océans (<http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/oceanacidification/>), a dressé une liste des questions les plus fréquemment posées (Foire Aux Questions, FAQ). Ces questions ont été largement diffusées à la communauté scientifique afin d'apporter des réponses concises résumant les connaissances actuelles, tout en évitant le jargon scientifique. Les réponses ont ensuite été soumises à une procédure d'examen publique et à une révision par des pairs afin d'assurer une bonne lisibilité et limiter les pertes au niveau de la précision scientifique. La réponse de la communauté a été enthousiaste. Au total, 27 scientifiques de 19 institutions et 5 pays ont contribué à l'ensemble du processus.

Nous espérons que cette FAQ sera utile et nous voudrions faire remarquer qu'il s'agit d'un processus continu. Chacun est invité à demander des précisions ou à faire parvenir ses commentaires à Sarah Cooley (scooley@whoi.edu). La liste sera révisée périodiquement en utilisant ces contributions.

Le terme «acidification des océans»

L'océan n'est pas acide, et les modèles prédictifs montrent que les océans ne deviendront jamais acides. Alors pourquoi parle-t-on d'acidification des océans ?

L'acidification des océans se réfère au processus de diminution du pH des océans (correspondant à une augmentation de la concentration en ions hydrogène) par la dissolution du dioxyde de carbone apporté dans l'eau de mer depuis l'atmosphère. Le mot «acidification» fait référence à l'abaissement du pH à partir de n'importe quel point de départ vers tout point final sur l'échelle de pH. Ce terme est utilisé dans de nombreux autres domaines scientifiques (dont la médecine et la science des aliments) pour se référer à l'ajout d'un acide dans une solution, indépendamment de la valeur du pH de la solution. Par exemple, même si le pH de l'eau de mer est supérieure à 7,0 (et donc considéré comme «basique» en terme d'échelle de pH), l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère entraîne une augmentation de l'acidité de l'océan et par conséquent un abaissement de son pH. Cette terminologie est comparable à celle que nous utilisons quand nous parlons de la température. Si la température de l'air passe de -40°C à -29°C (-40°F à -20°F), il fait toujours froid, mais nous parlons de «réchauffement». — J. Orr, C.L. Sabine, R. Key

<http://www.epoca-project.eu/index.php/FAQ.html>

A first EU response:



- Large-scale IP: ocean acidification & its consequences
 - 100+ scientists
 - 27 institutes
 - 9 countries
- Total budget: 16 M€ (6.5 M€ from EU)
- 2008-2012

EPOCA Coordinator: J.-P. Gattuso
(LOV, Villefranche-sur-mer, France)

