

**Impacts de l'acidification des océans  
sur les organismes benthiques calcifiants  
des milieux côtiers tempérés**



CNRS UPMC

Station Biologique  
Roscoff

UMR 7144 – Equipe ReTroProd

Directeurs de thèse

Sophie Martin  
Dominique Davoult

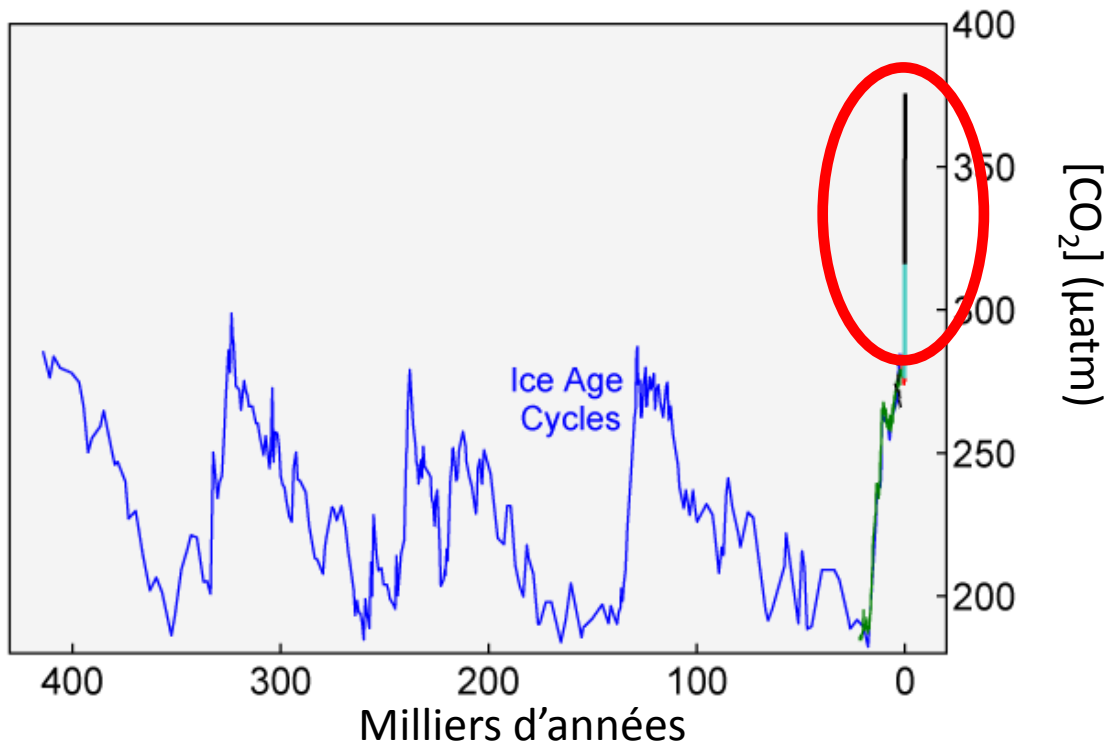
# Augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique



## Augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique



# Conséquences de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique

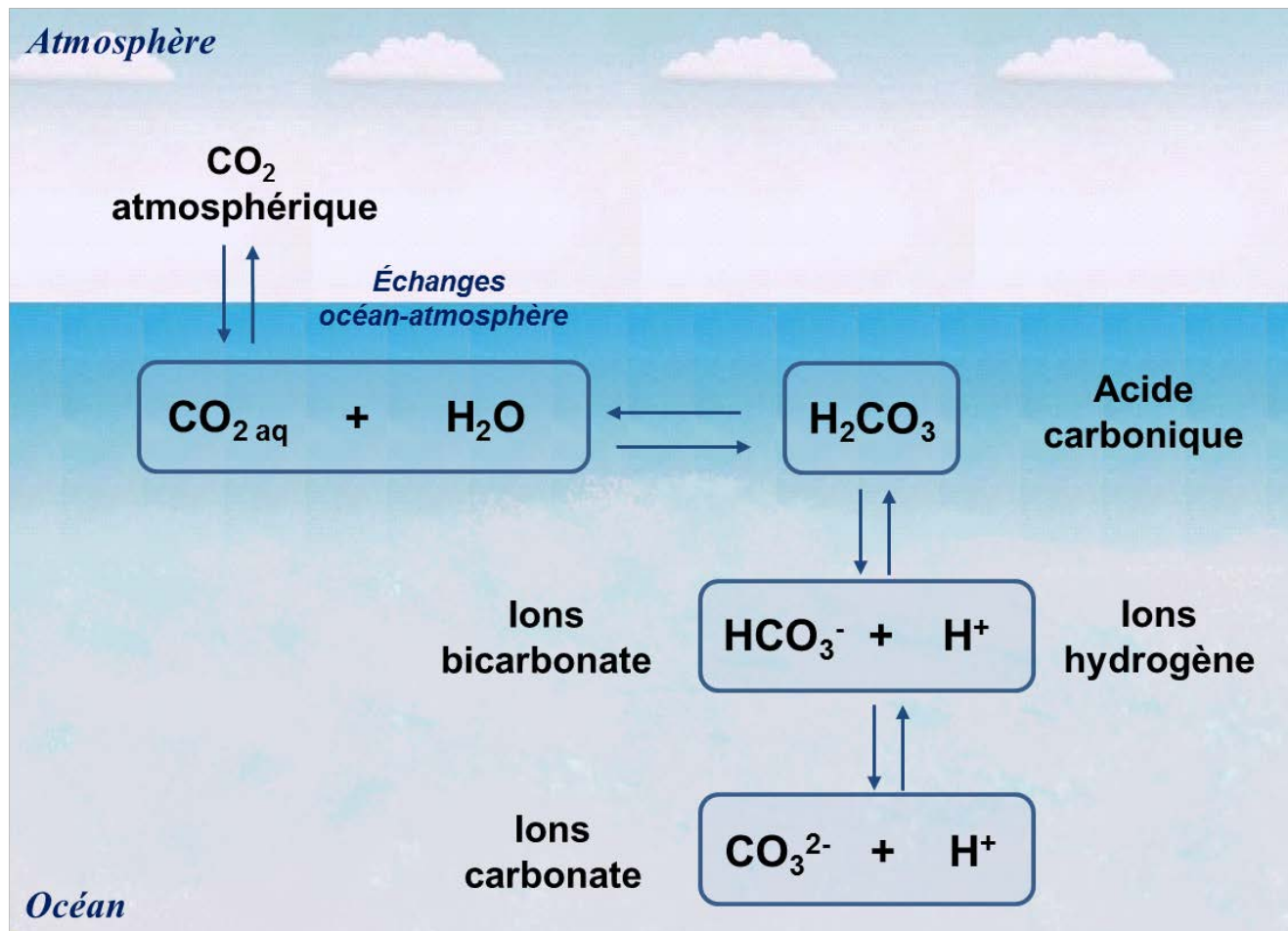


Variation de la pCO<sub>2</sub> atmosphérique sur 400 000 ans

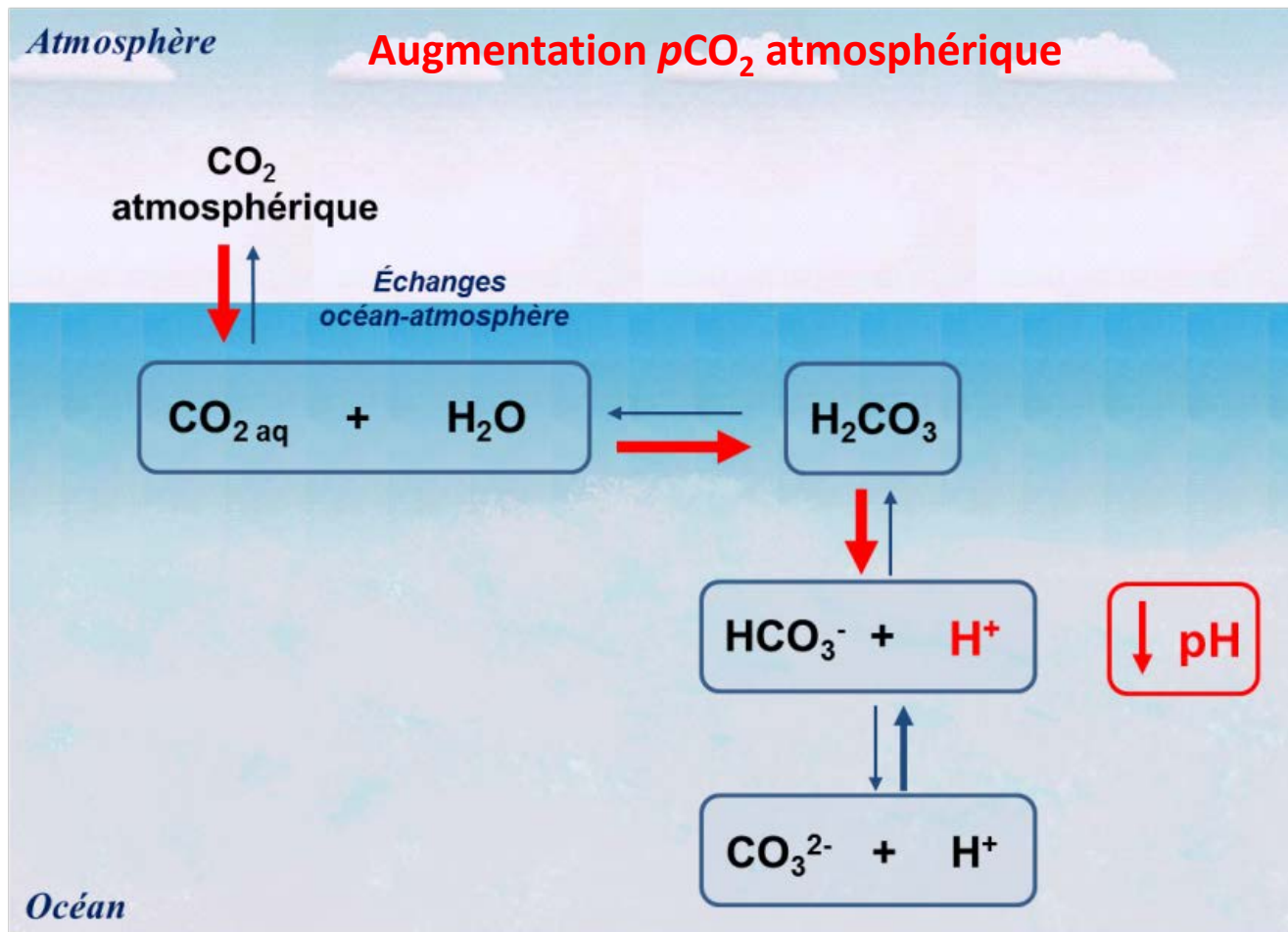
Réchauffement climatique

Acidification des océans

# Système des carbone-carbonates



# Acidification des océans



# Scénarios d'augmentation de la $p\text{CO}_2$ pour la fin du siècle

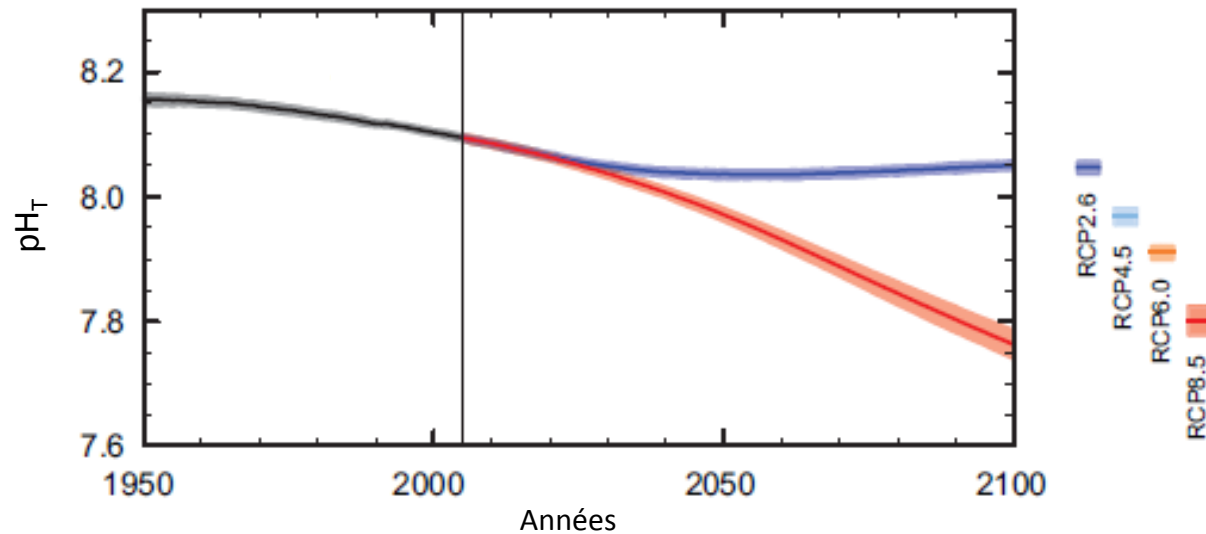


Scénario optimiste

490  $\mu\text{atm}$

Scénario pessimiste

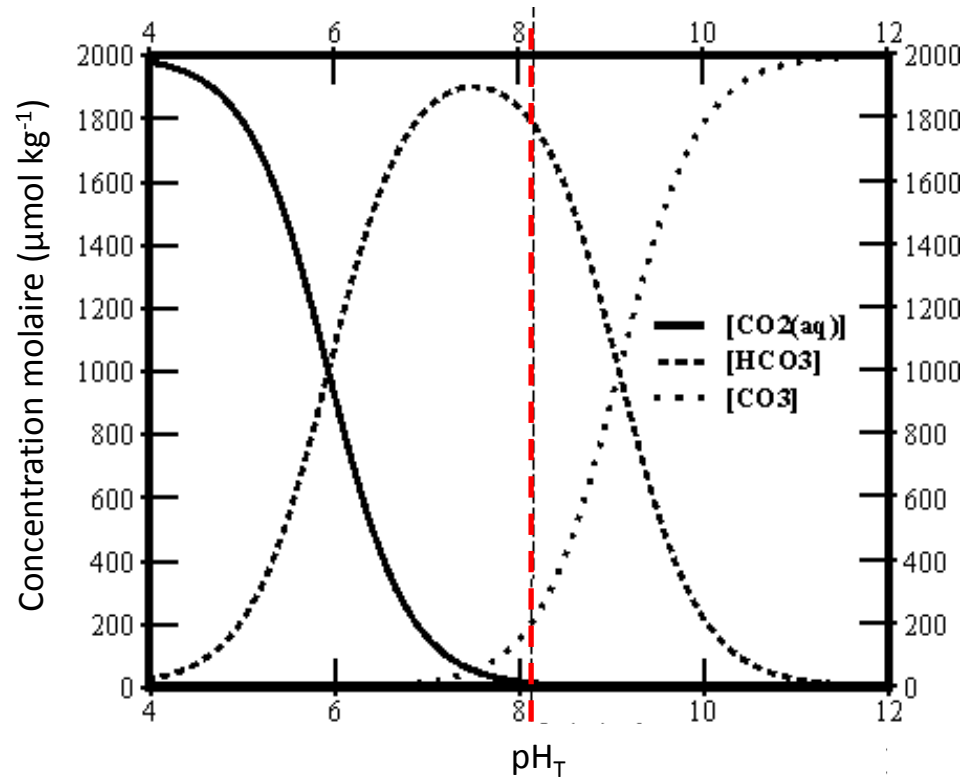
1370  $\mu\text{atm}$



Diminution globale du pH océanique

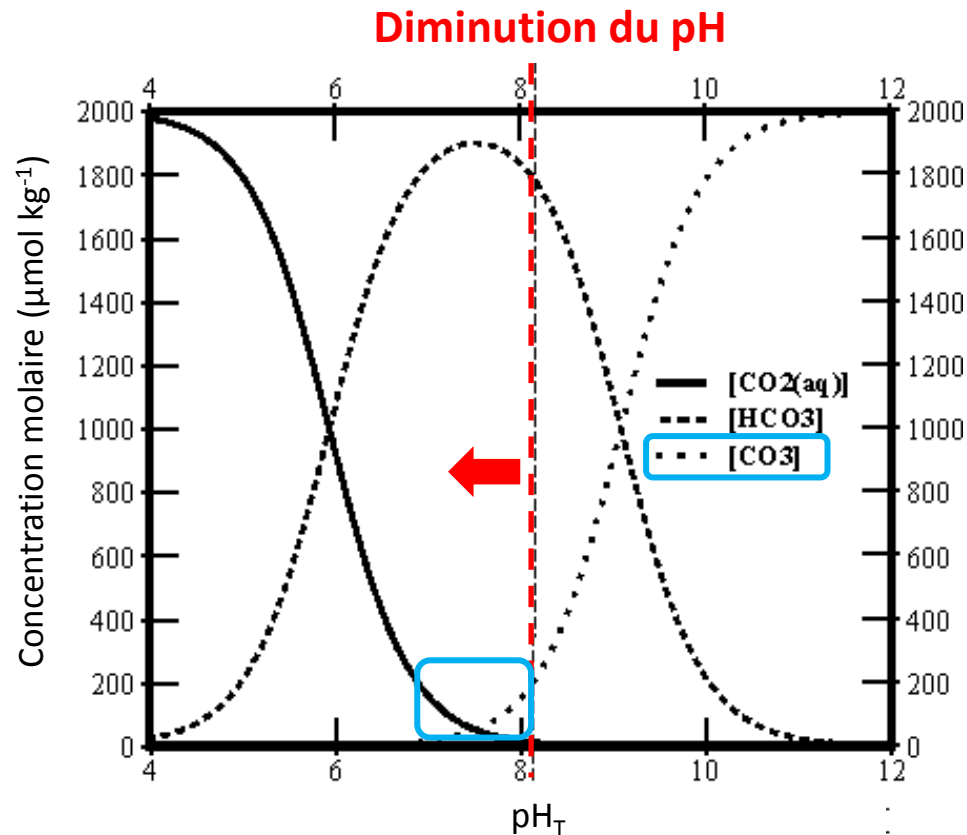
# Conséquences chimiques de l'acidification

**pH actuel moyen de l'eau de mer : 8,1**



Répartition des différentes formes de  
CID en fonction du pH

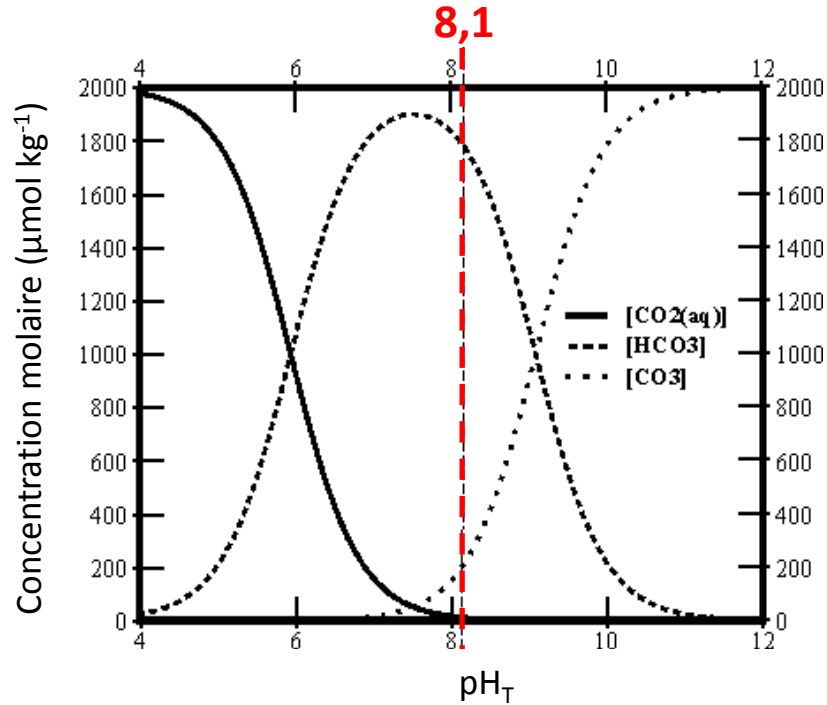
# Conséquences chimiques de l'acidification



- Augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub>
- Diminution de la concentration en CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>



# Conséquences chimiques de l'acidification



Etat de saturation en carbonates de calcium de l'eau de mer

$$\Omega = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{EdM}} \times [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{EdM}}}{K_{\text{sp}}}$$

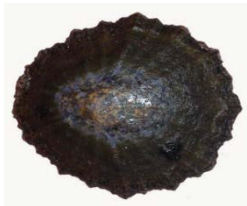
- Diminution du pH
- Augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$
- Diminution de la concentration en  $\text{CO}_3^{2-}$
- Diminution de l'état de saturation de l'eau de mer en  $\text{CaCO}_3$

# Impact particulier sur les espèces calcifiantes

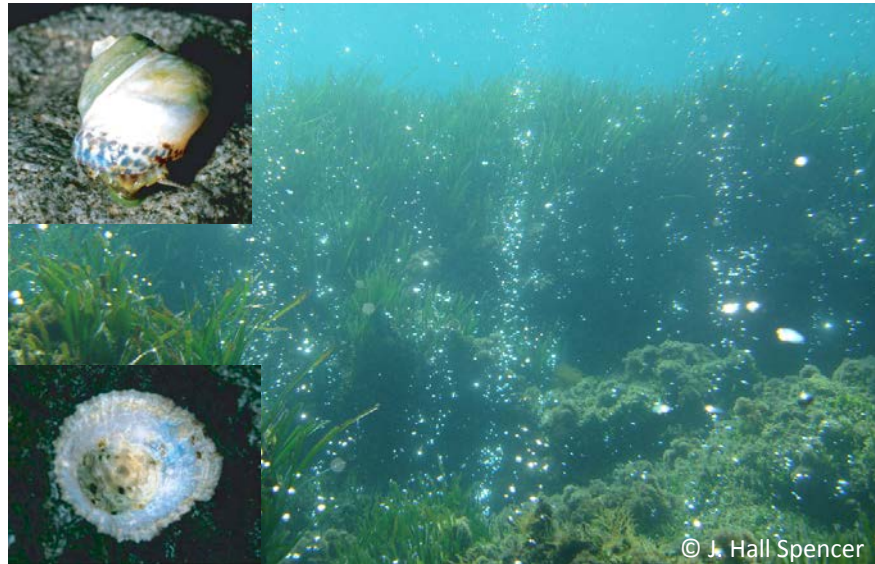
$\Omega > 1$  : eau de mer sursaturée en  $\text{CaCO}_3$  → calcification favorisée  
 $\Omega < 1$  : eau de mer sous saturée en  $\text{CaCO}_3$  → dissolution favorisée



*Gibbula* sp.



*Patella* sp.



© J. Hall Spencer

Site naturellement acidifié d'Ischia ( $\text{pH}_T$  7,4)

*Hall-Spencer et al. 2008, Nature*

# Espèces calcifiantes en zone côtière

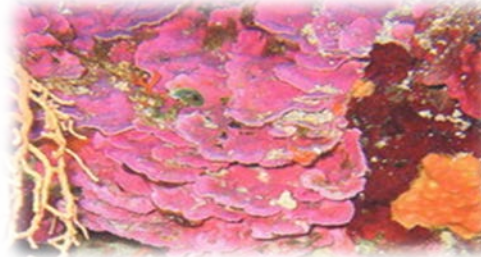
- Largement distribuées
- Espèces ingénieures
- Forte productivité
- Importante production de carbonate de calcium

Récifs coralliens



1 - 7 kg C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
0,5 - 12,5 kg CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
Gattuso *et al.* 1998 Ann. Rev. Ecol. Syst.

Coralligène méditerranéen



175 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
950 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
Martin *et al.* 2013 Eur. J. Phycol.

Mollusques

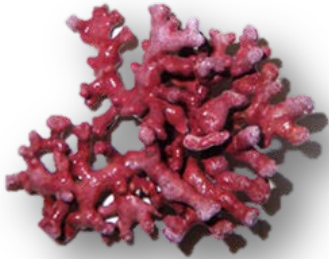


50 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
50 - 100 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
Gutiérrez *et al.* 2003 Oikos

## Objectifs

**Quels sont les impacts de l'acidification des océans  
sur les espèces calcifiantes majeures  
en milieu côtier tempéré ?**

## Deux espèces ingénieuses formant des habitats à forte biodiversité



*Lithothamnion corallioides*



© E. Amice

Banc de maërl



*Crepidula fornicata*



© Y. Fontana

Population de crépidules

# Le maërl, espèce d'intérêts écologique, économique et patrimonial

## ➤ Intérêt écologique

- Espèce ingénieure
- Microhabitats
- Zone de recrutement et nurserie

## ➤ Intérêt économique

- Amendement calcaire traditionnel
- Nombreuses applications récentes

## ➤ Intérêt patrimonial

- Espèce emblématique classée
- Fin de l'exploitation en 2013
- Conservation et gestion de l'espèce



# La crépidule, espèce introduite

## ➤ Enjeux écologiques

- Populations de centaines d'individus/m<sup>2</sup>
- Envasement à grande échelle
- Microhabitats à petite échelle
- Compétition spatiale et trophique

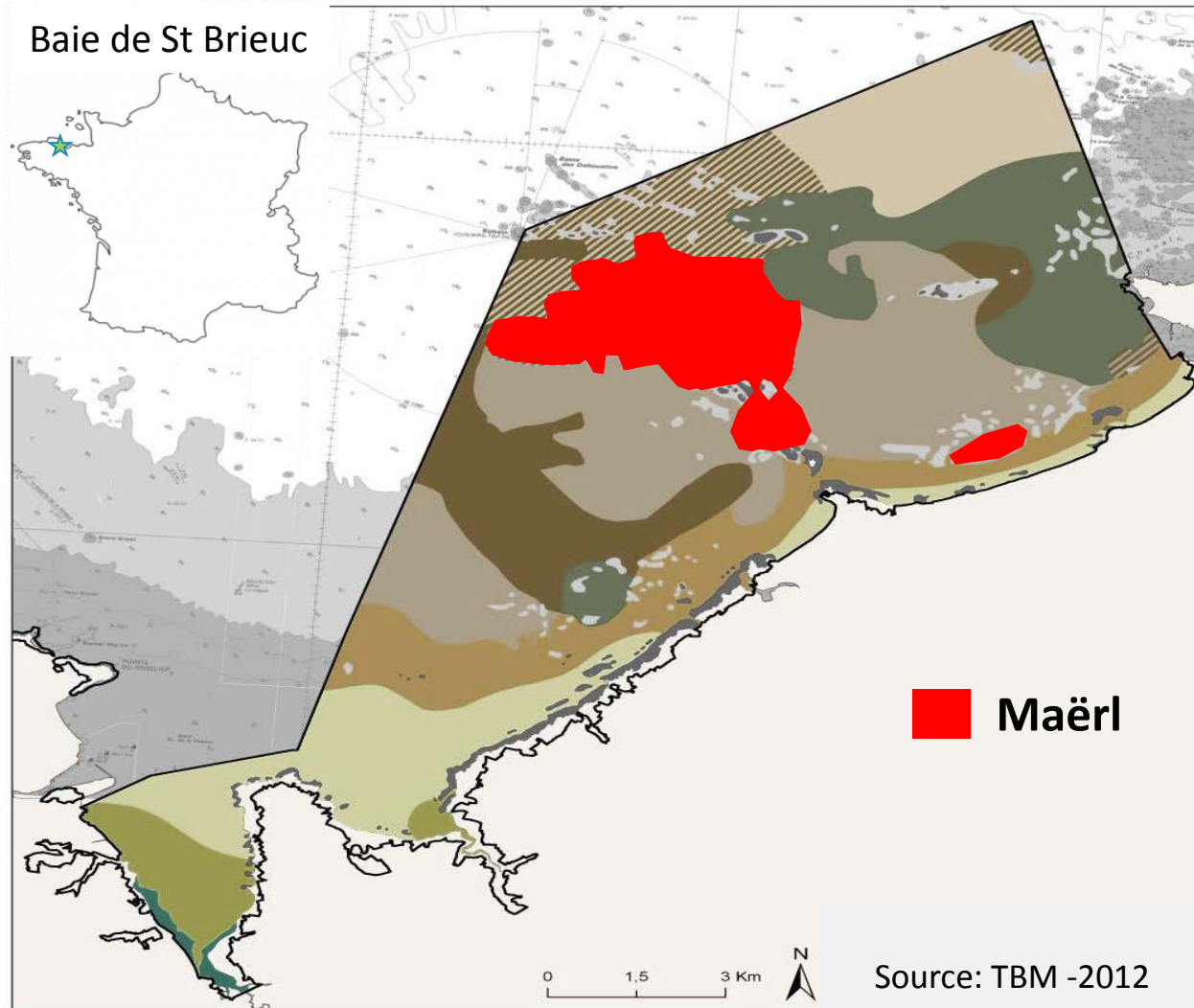


## ➤ Enjeux économiques

- Coûts de nettoyage des espèces commerciales
- Valorisation par la commercialisation

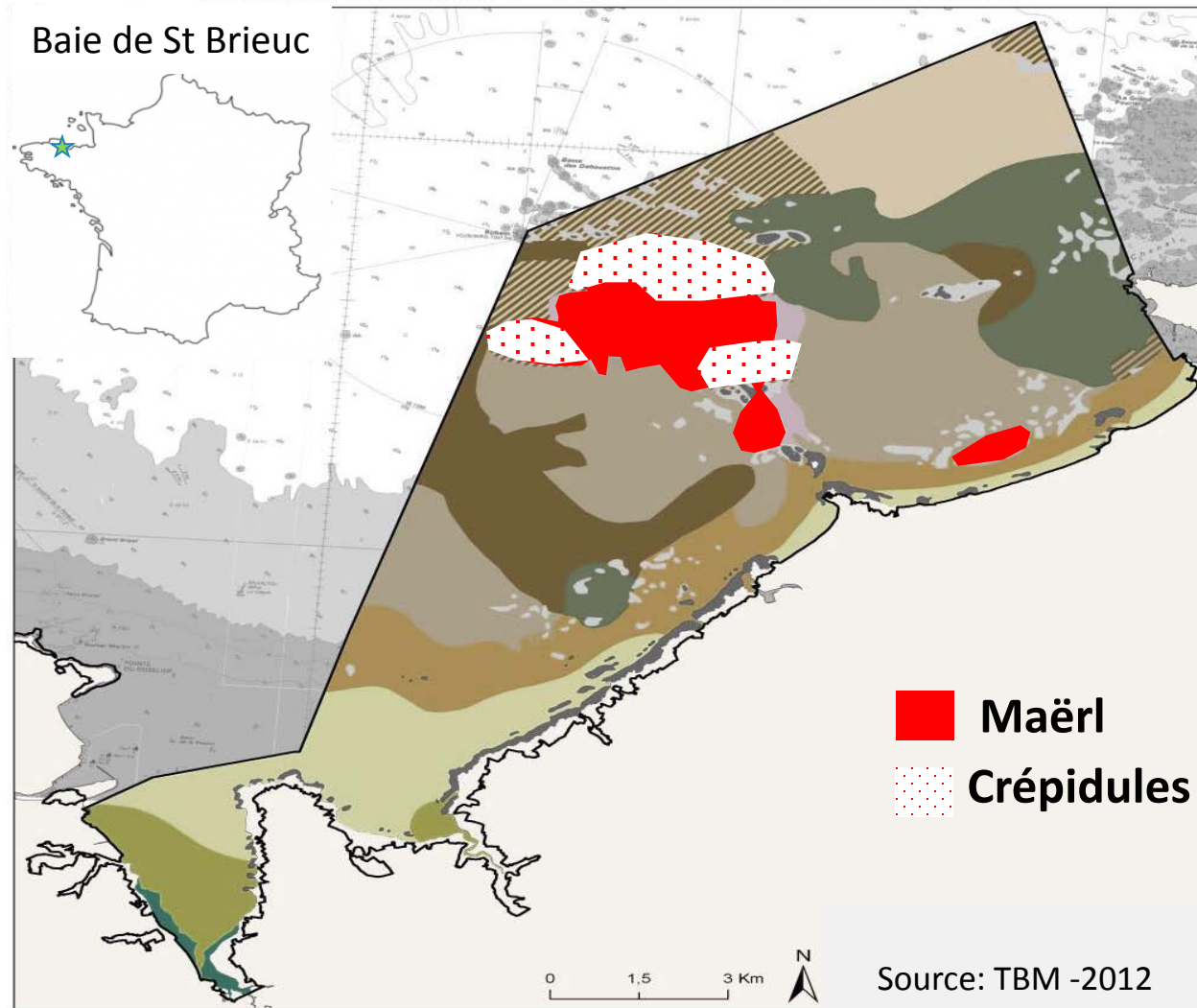


# Coexistence des populations de maërl et de crépidules

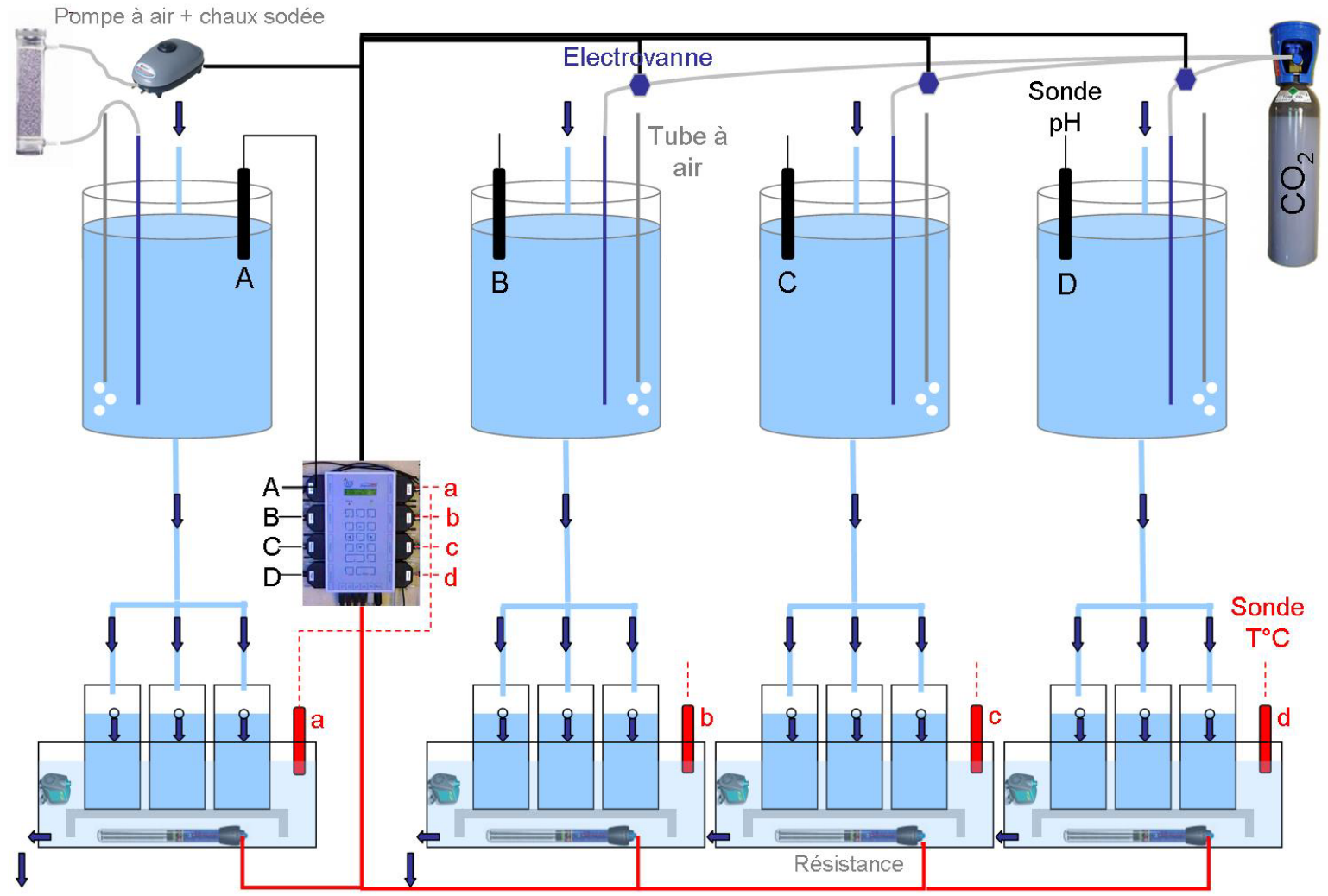




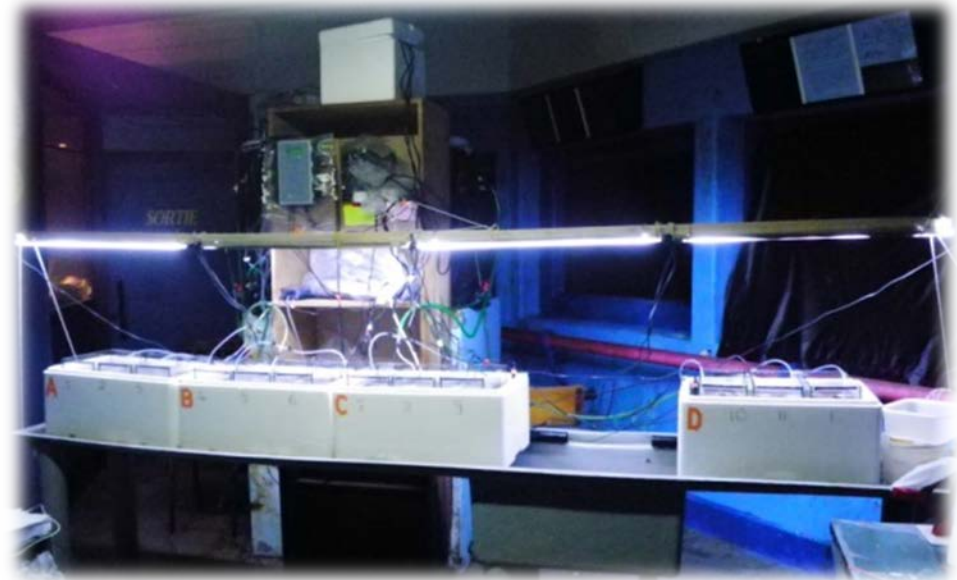
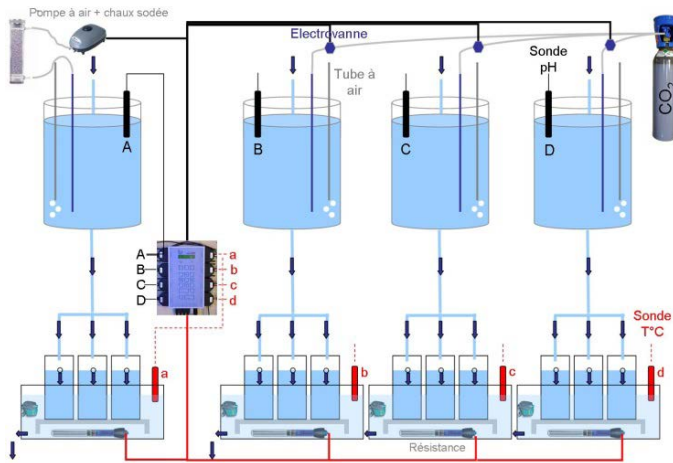
# Coexistence des populations de maërl et de crépidules



# Expérimentation en mésocosme



# Expérimentation en mésocosme

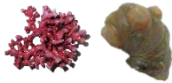


# Mesures physiologiques

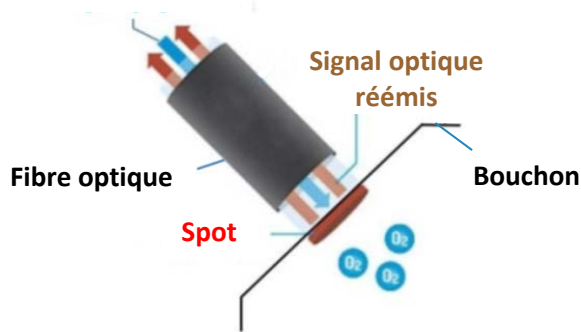
## Production / Respiration

Variations [O<sub>2</sub>]

(Fibox)



Signal optique émis



## Excrétion ammoniacale

Variation [ammonium]

(Spectrophotométrie)

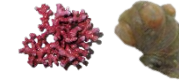


Chambre d'incubation

## Calcification - Dissolution

Variation d'alcalinité

(Titration à l'HCl)

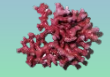


## Filtration

Variation [microalgues]

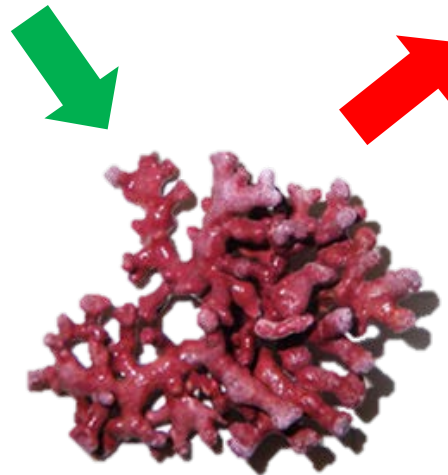
(Cytométrie en flux)



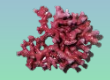


## Quels sont les impacts de l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ sur les processus métaboliques du maërl ?

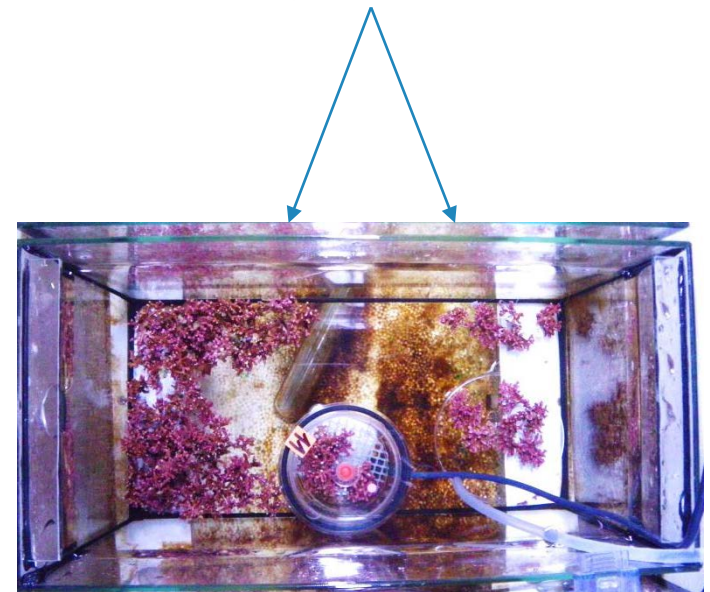
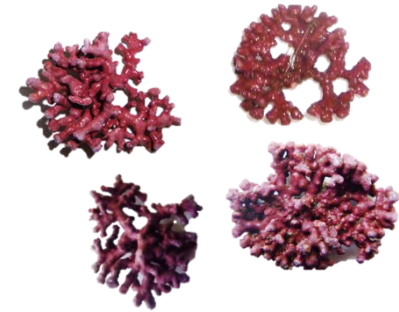
Photosynthèse      Respiration

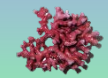


Calcification

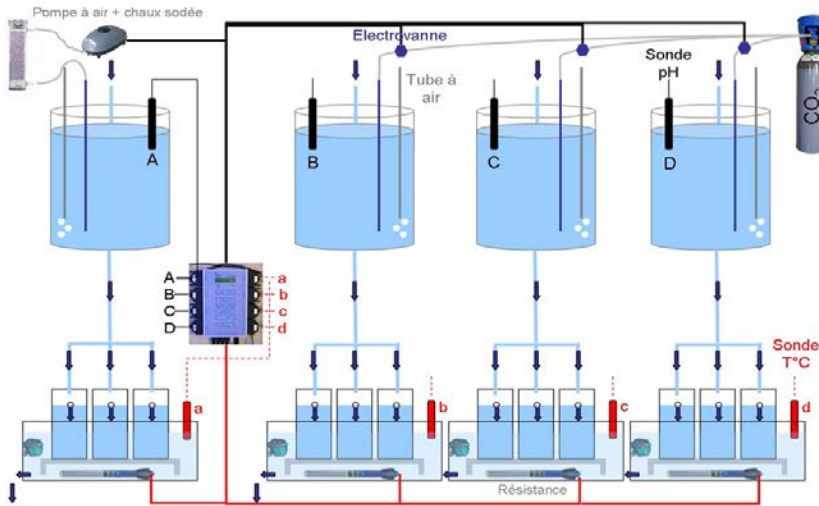


# Echantillonnage





# Paramètres expérimentaux

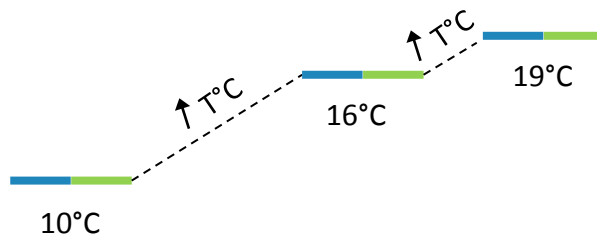


## $p\text{CO}_2$

- 380  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  8,1)
- 550  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,9)
- 750  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,8)
- 1000  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,7)

## Température

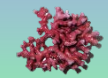
- 10°C: moyenne hivernale
- 16°C: moyenne estivale
- 19°C: moyenne estivale + 3°C



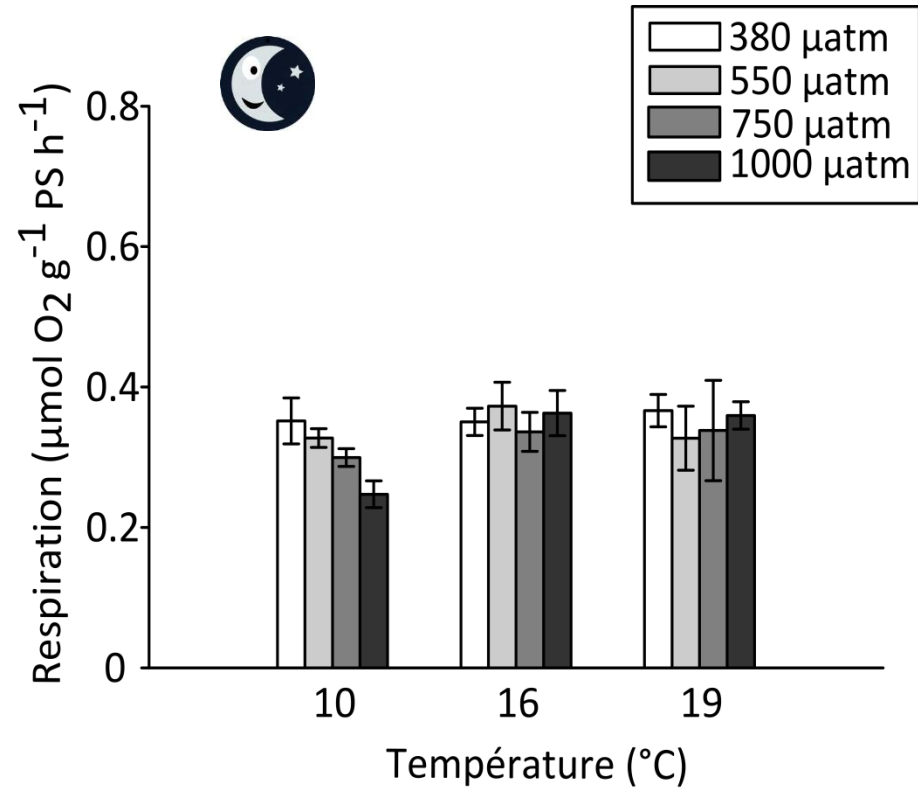
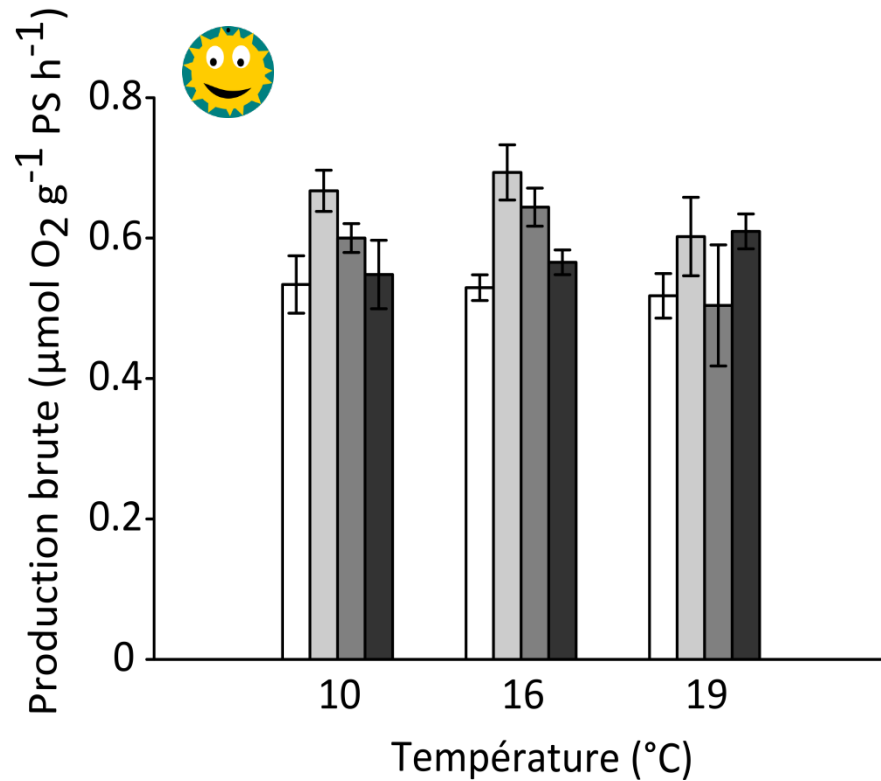
- Acclimatation
- Incubations

## Lumière

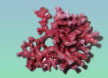
Constante, moyenne annuelle  
15  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$



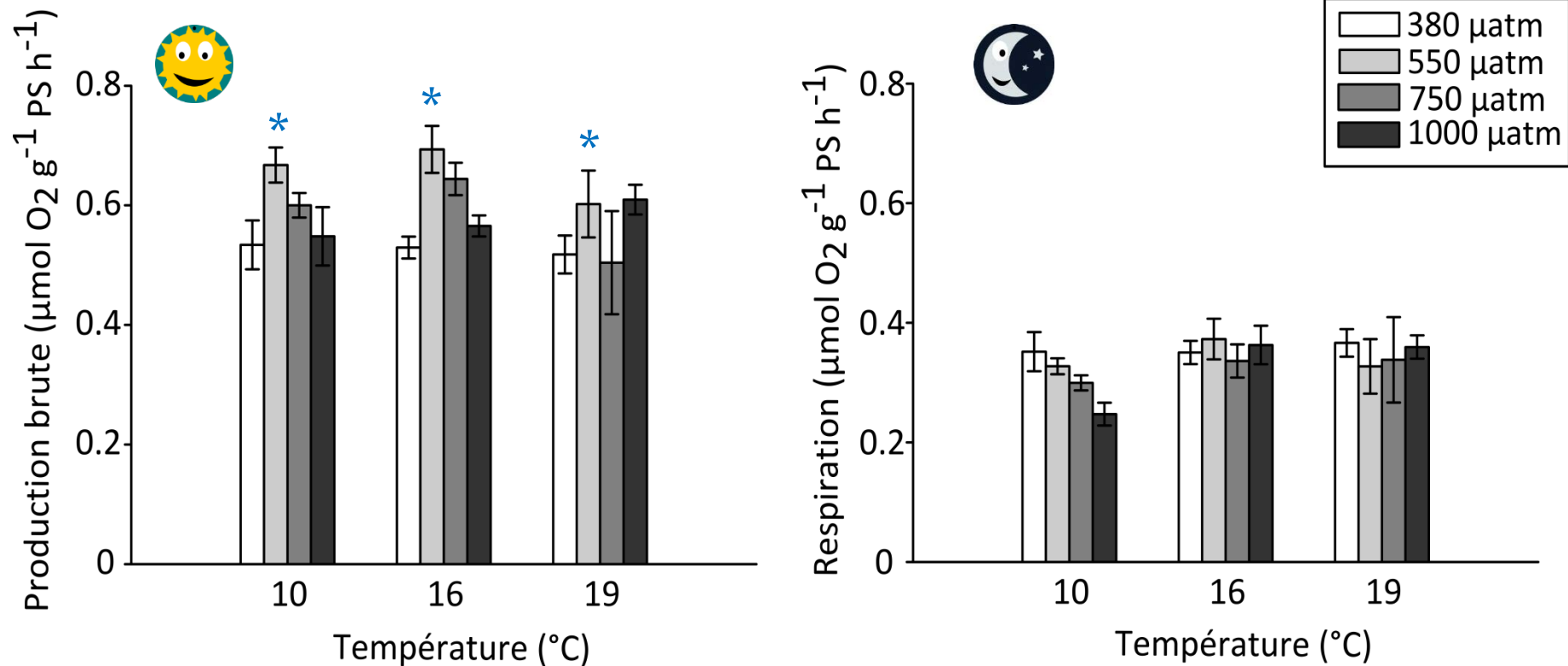
## Résultats de production / respiration



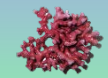




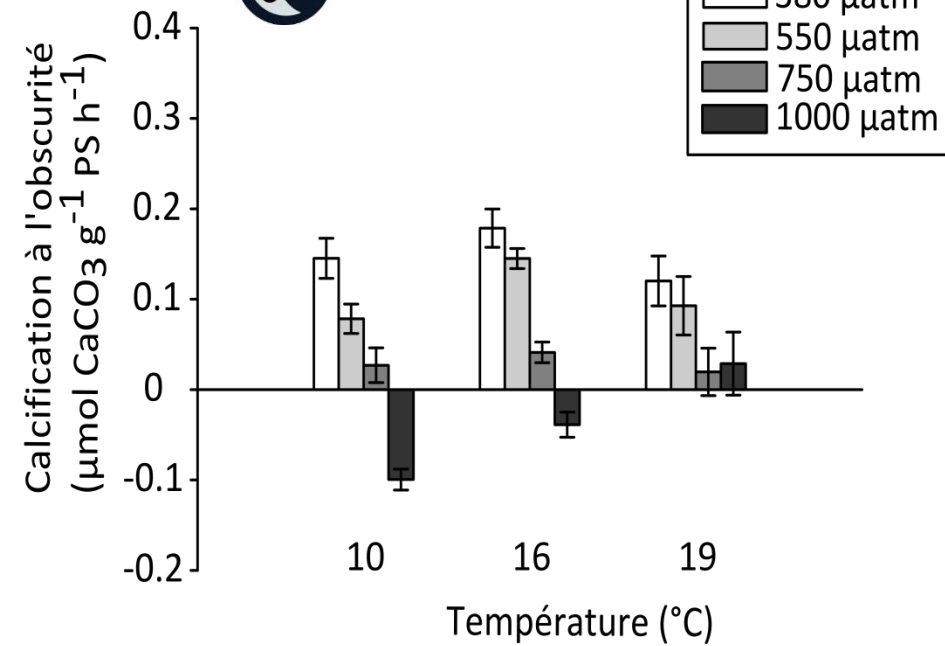
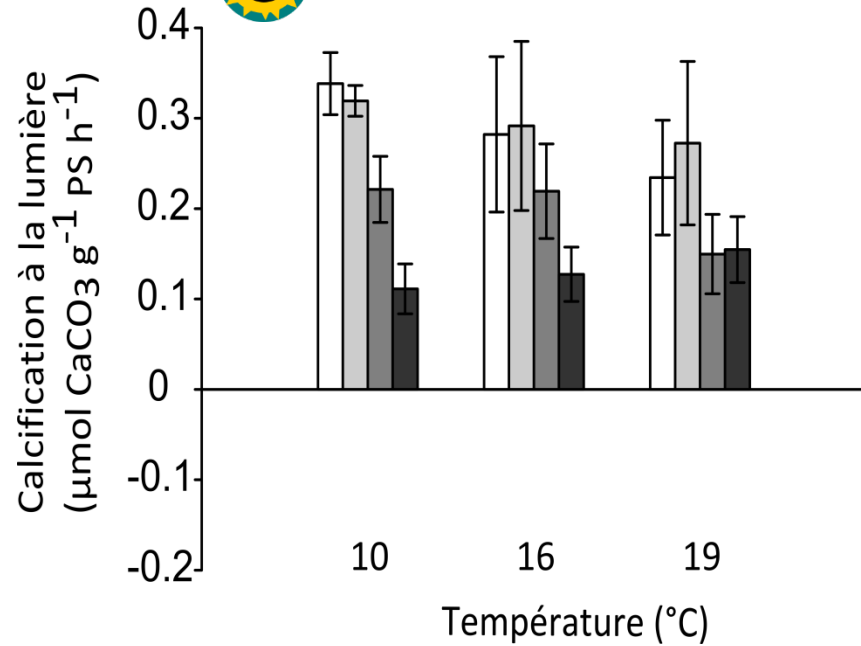
## Résultats de production / respiration

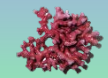


- Augmentation de la production brute à 550  $\mu\text{atm}$
- Production diminue ensuite avec l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$
- Aucun effet sur la respiration

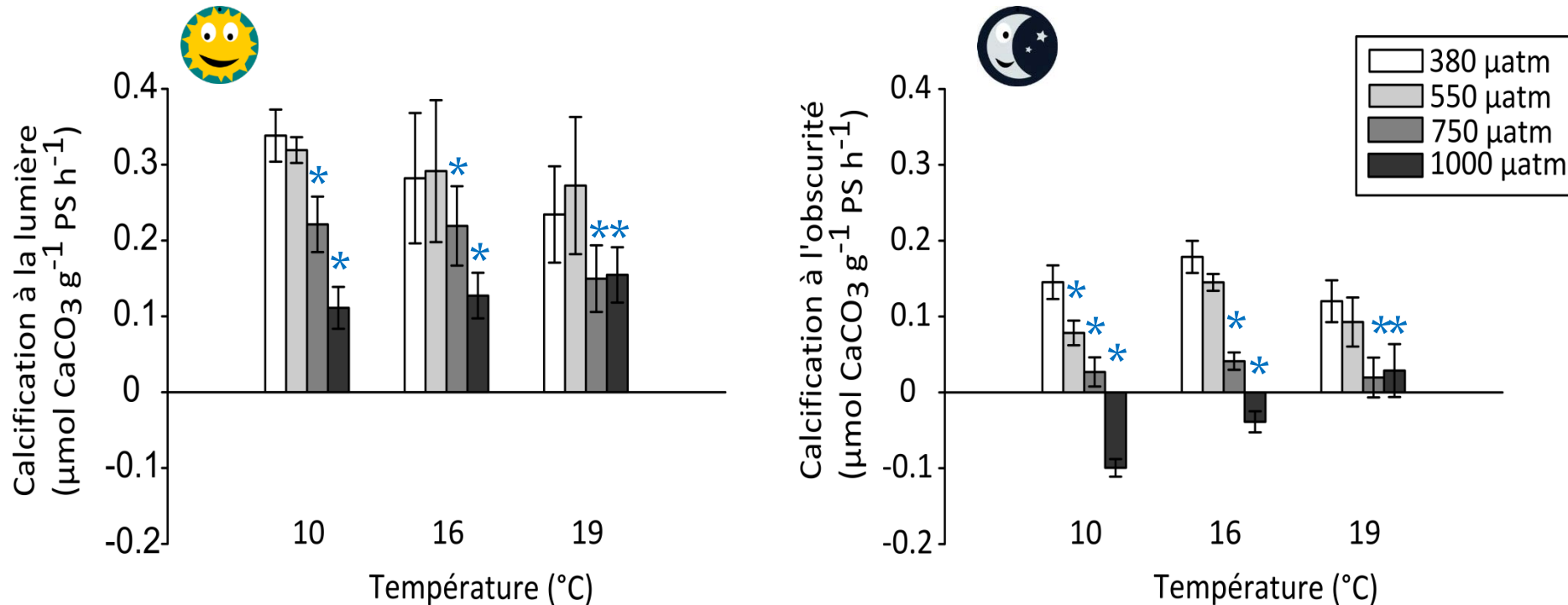


## Résultats de calcification

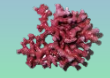




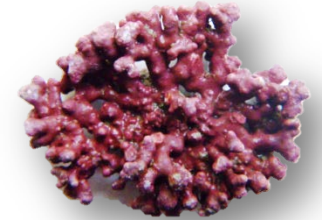
## Résultats de calcification



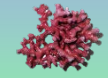
- Calcification lumière > calcification obscurité
- Diminution de la calcification avec la  $p\text{CO}_2$
- A l'obscurité, dissolution à 1000  $\mu\text{atm}$
- A 1000  $\mu\text{atm}$ , effet positif de la température



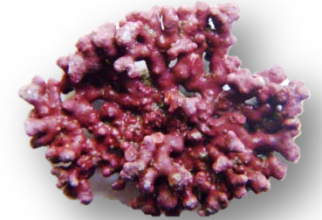
## Conclusions - maërl



- Potentiellement pas de mécanismes d'acquisition de carbone, mais limité à la diffusion passive du CO<sub>2</sub>



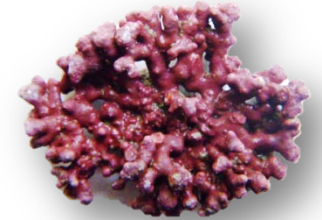
## Conclusions - maërl



- Potentiellement pas de mécanismes d'acquisition de carbone, mais limité à la diffusion passive du CO<sub>2</sub>
- Fort impact de la  $p\text{CO}_2$  future sur la calcification  
Diminution de 50 à 80 % de la calcification nette à la journée



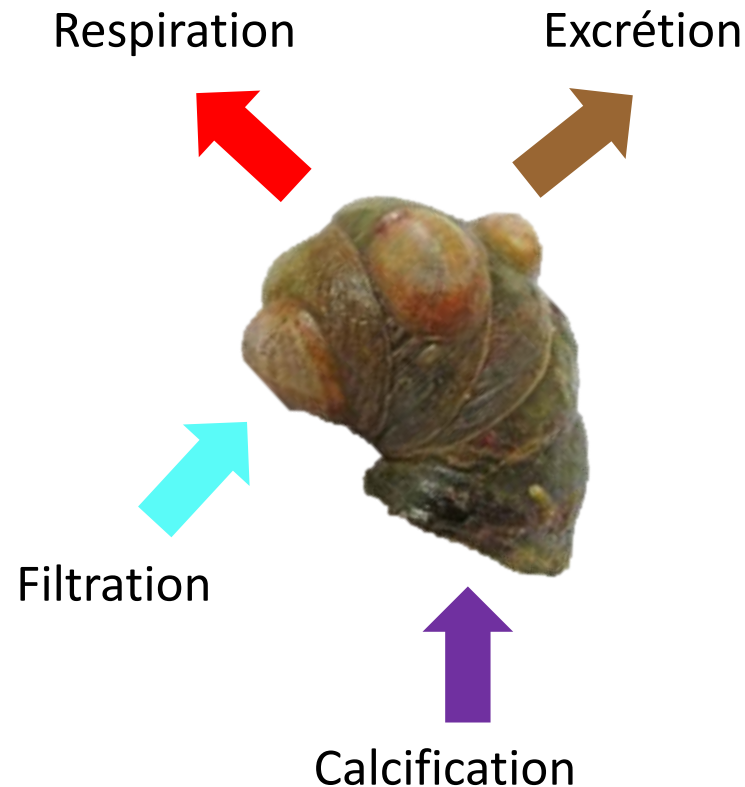
## Conclusions - maërl



- Potentiellement pas de mécanismes d'acquisition de carbone, mais limité à la diffusion passive du  $\text{CO}_2$
- Fort impact de la  $p\text{CO}_2$  future sur la calcification  
Diminution de 50 à 80 % de la calcification nette à la journée
- Interaction  $p\text{CO}_2$  et température à approfondir

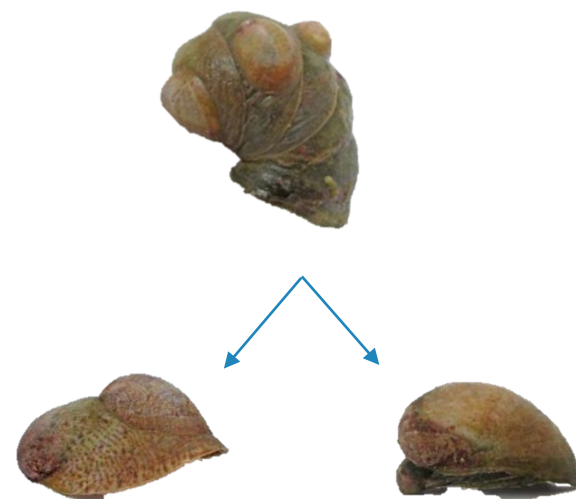
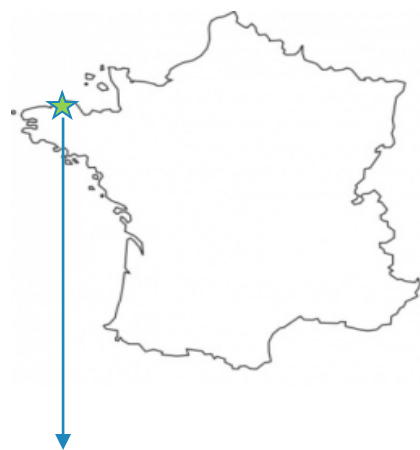


## Quels sont les impacts de l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ sur la physiologie de la crépidule ?





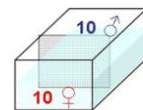
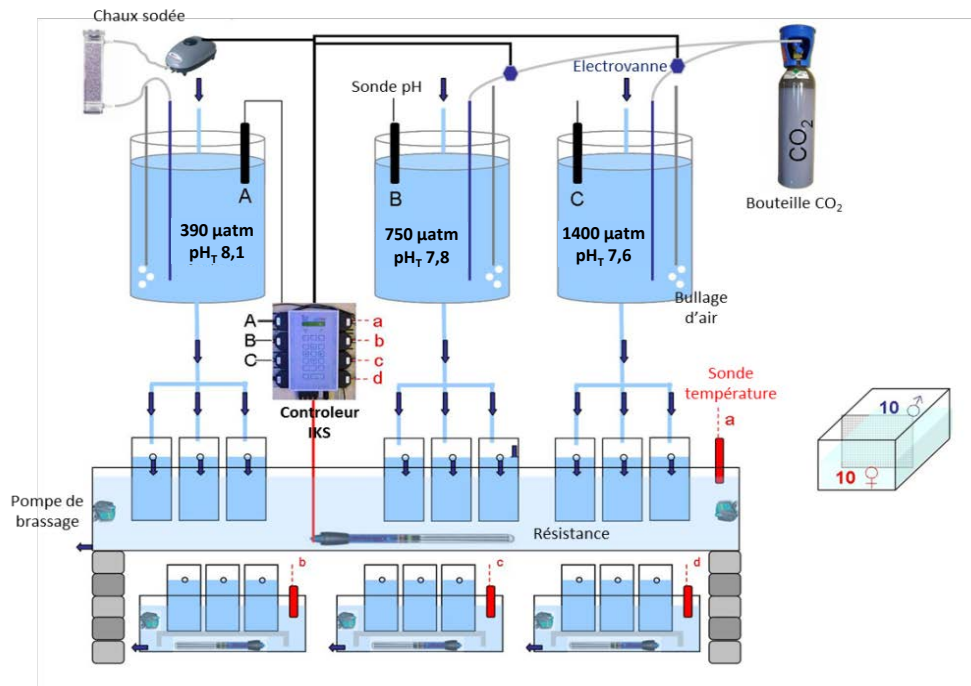
# Echantillonnage







# Paramètres expérimentaux



Aquariums pour males et femelles isolés

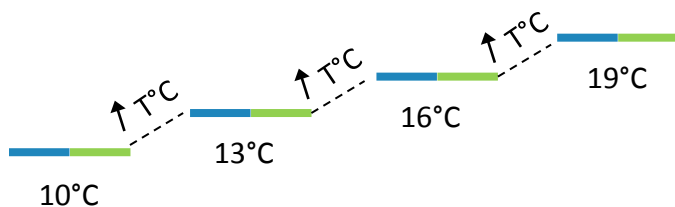
**$p\text{CO}_2$**

390  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  8,1)  
 750  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,8)  
 1400  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,6)

**Température**

10°C: moyenne hivernale  
 13°C: moyenne printanière  
 16°C: moyenne estivale  
 19°C: moyenne estivale + 3°C

Augmentation lente de la température  
 0,2°C/j  
 Acclimatation 3 semaines



— Acclimatation  
 — Incubations



## Mesures physiologiques

### Individu entier:

Respiration  
Excrétion  
Calcification nette  
Filtration





## Mesures physiologiques

### Individu entier:

Respiration  
Excrétion  
Calcification nette  
Filtration



### Tissus mous:

Respiration  
Excrétion  
Calcification brute





## Mesures physiologiques

### Individu entier:

Respiration  
Excrétion  
Calcification nette  
Filtration



### Tissus mous:

Respiration  
Excrétion  
Calcification brute



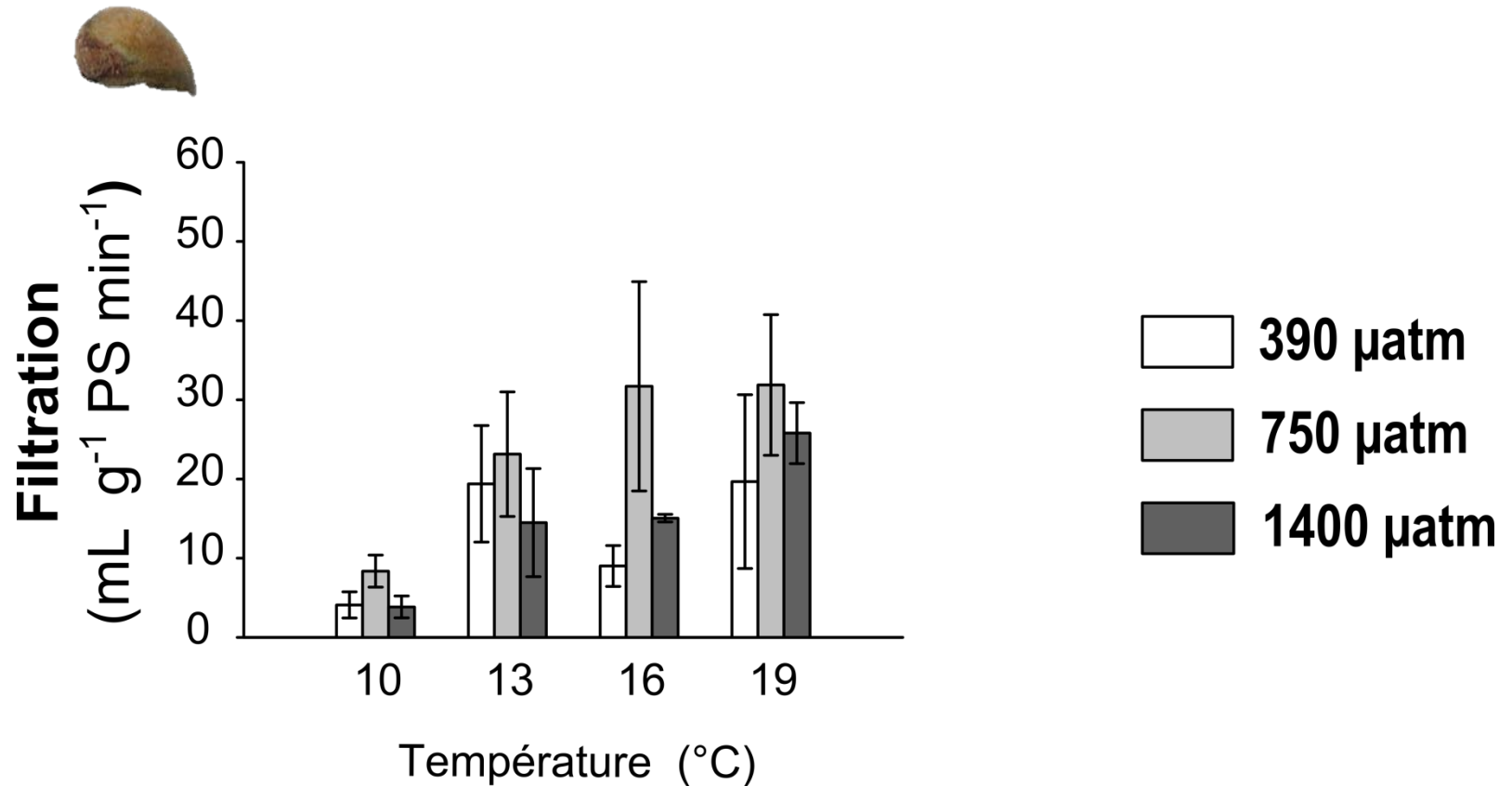
### Coquille vide:

Flux  $O_2$   
Flux  $NH_4^+$   
Flux  $CaCO_3$



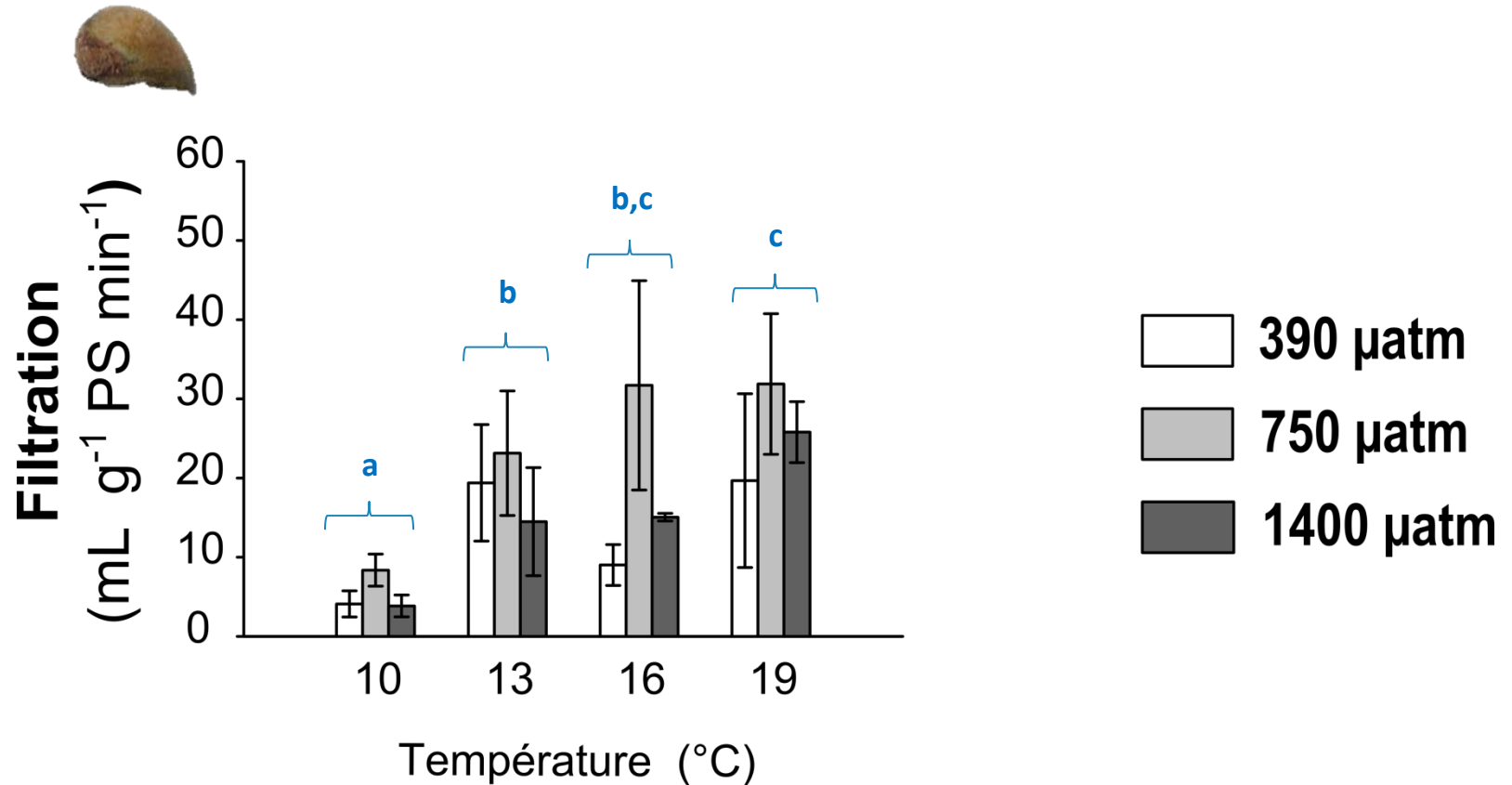


## Résultats filtration





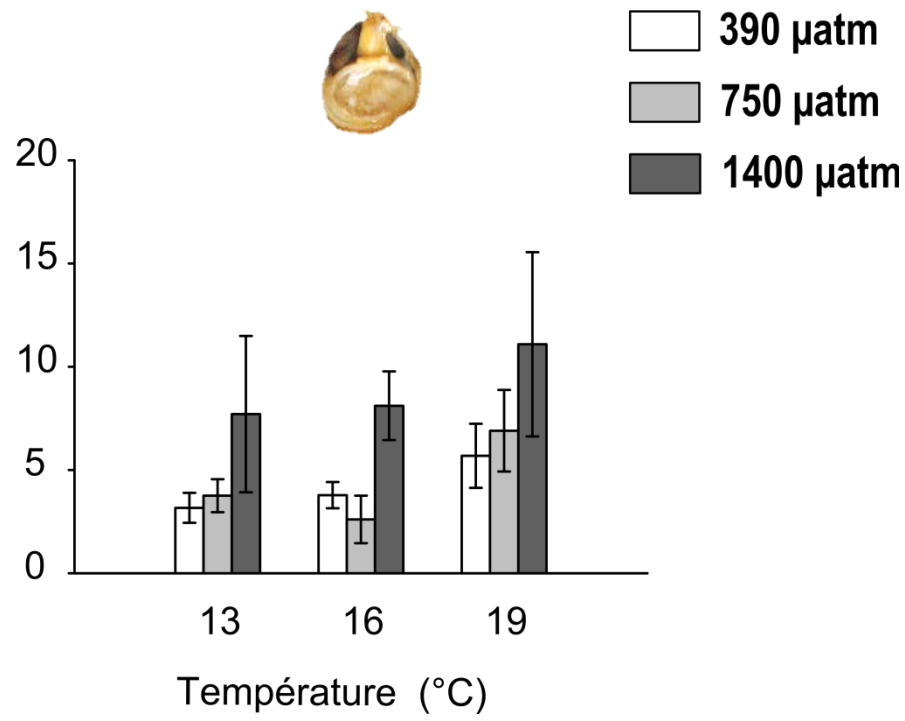
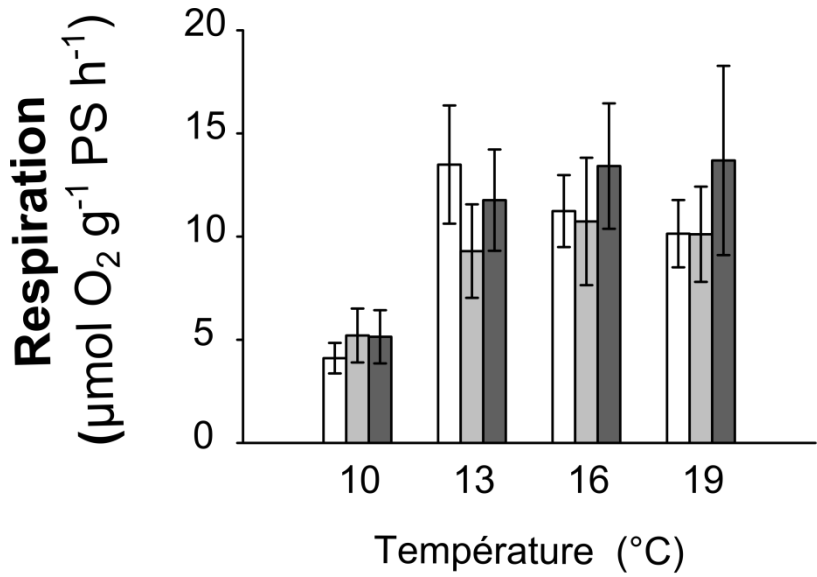
## Résultats filtration



- Pas d'effet  $p\text{CO}_2$
- ↑ filtration avec la température

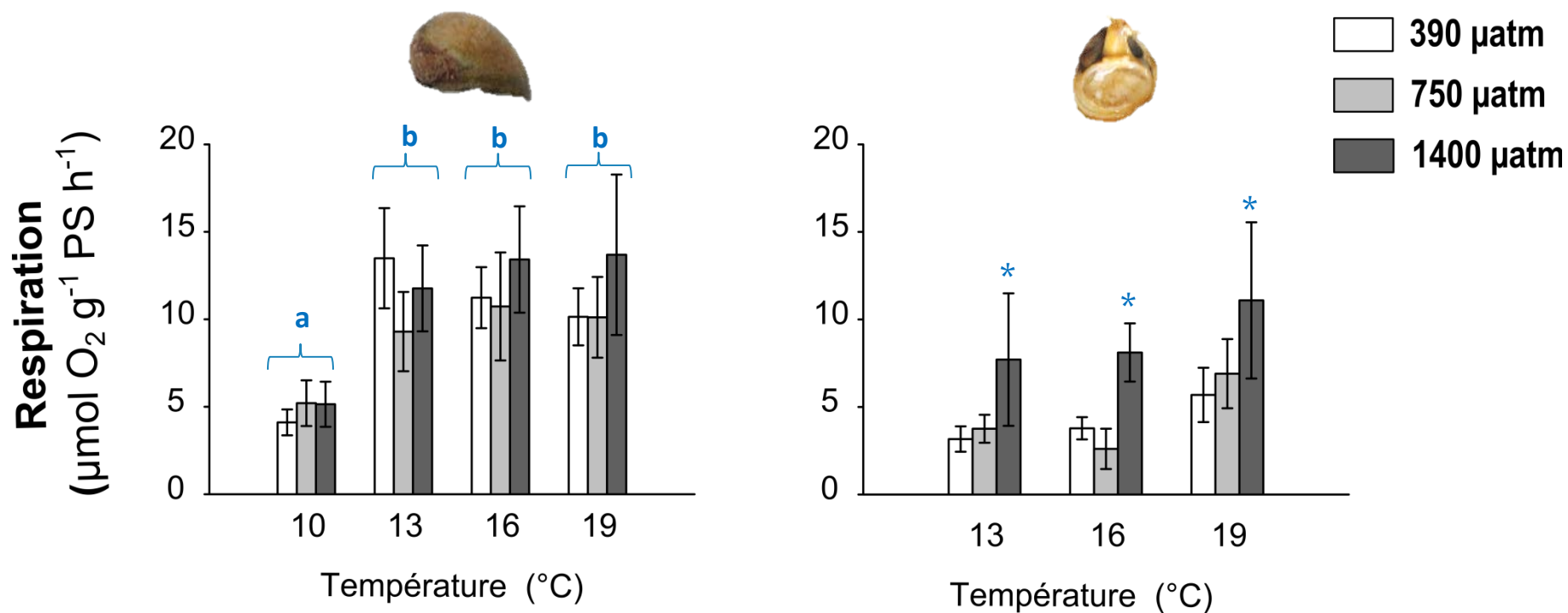


# Résultats respiration





## Résultats respiration



➤ **Individu entier**

Pas d'effet  $p\text{CO}_2$

↑ respiration avec température

➤ **Tissus mous**

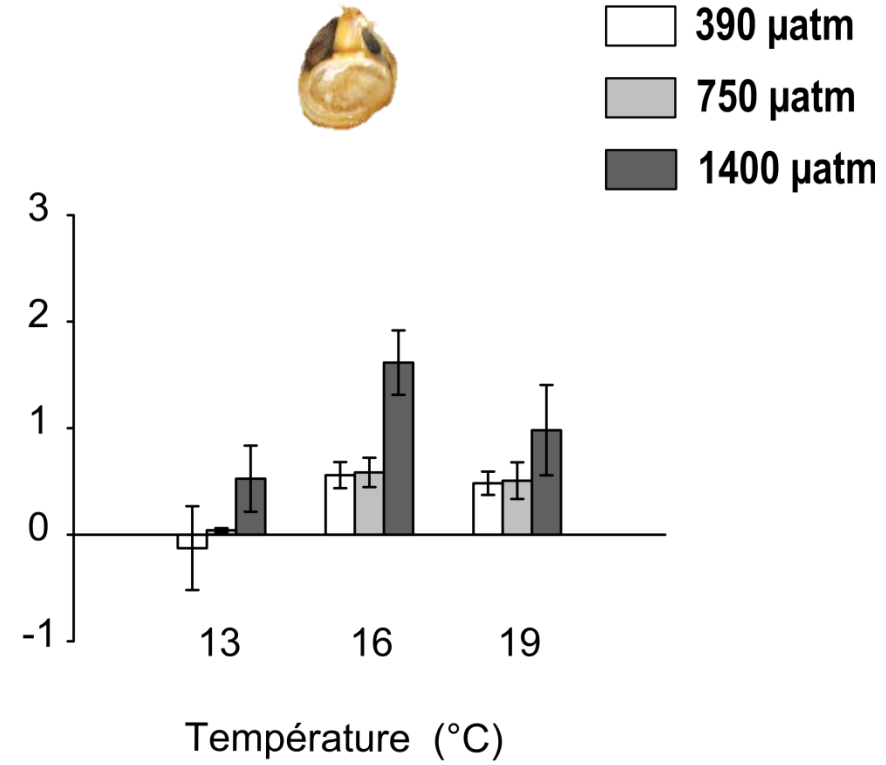
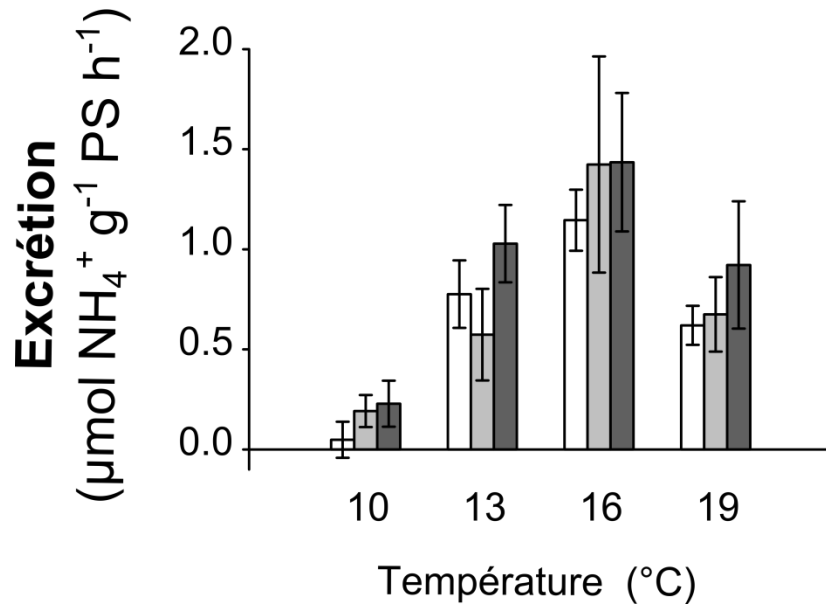
Pas d'effet température

↑ respiration à 1400  $\mu\text{atm}$



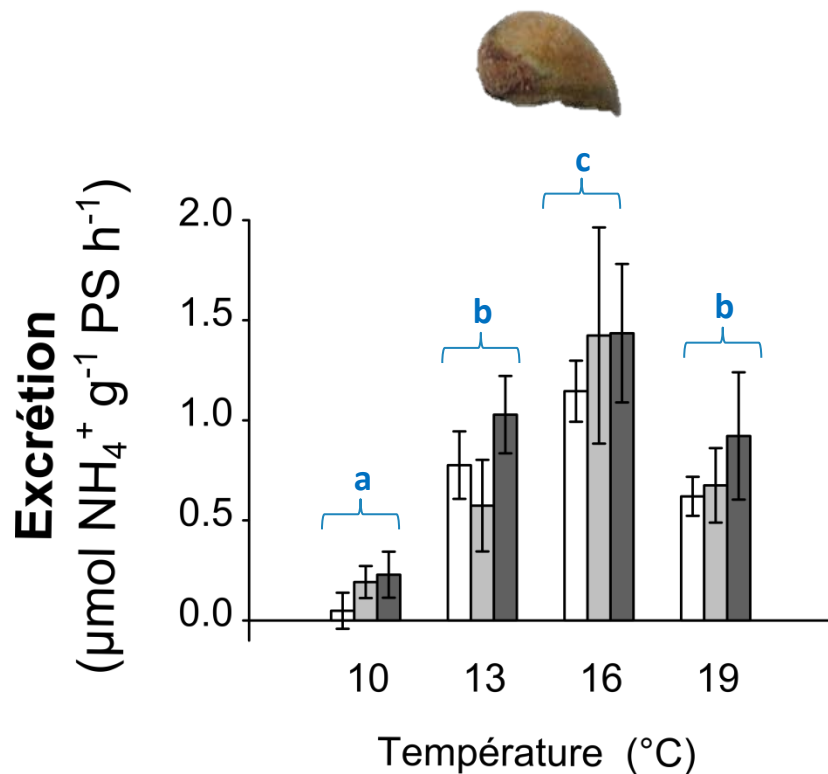


## Résultats excrétion

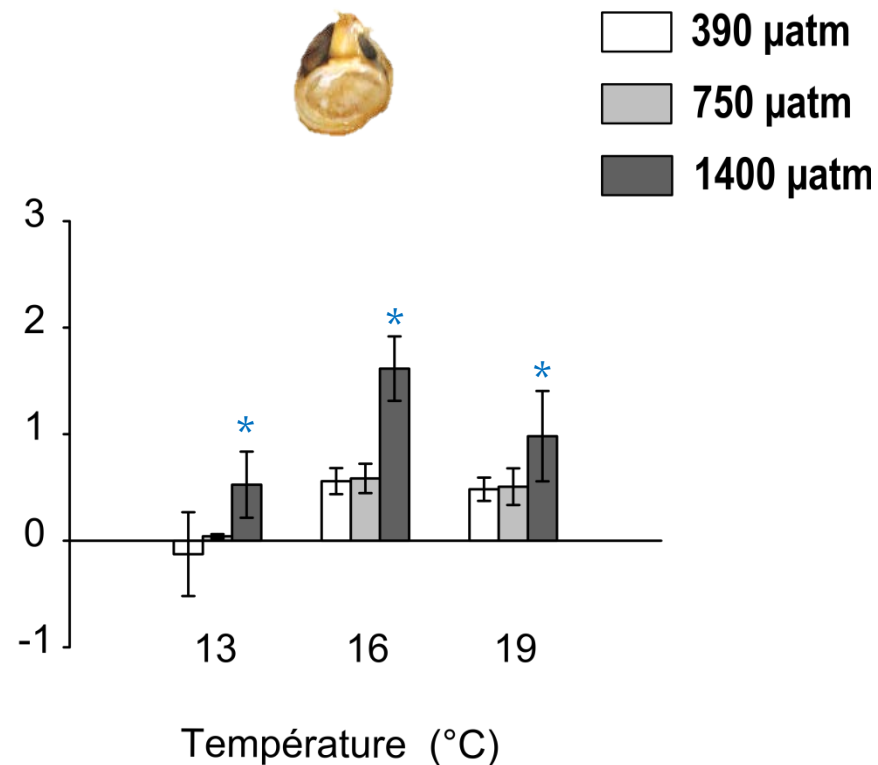




## Résultats excrétion



- **Individu entier**  
Pas d'effet  $p\text{CO}_2$   
 $\cap$  avec température



- **Tissus mous**  
 $13^{\circ}\text{C} < 16$  et  $19^{\circ}\text{C}$   
 $\uparrow$  excrétion à 1400  $\mu\text{atm}$

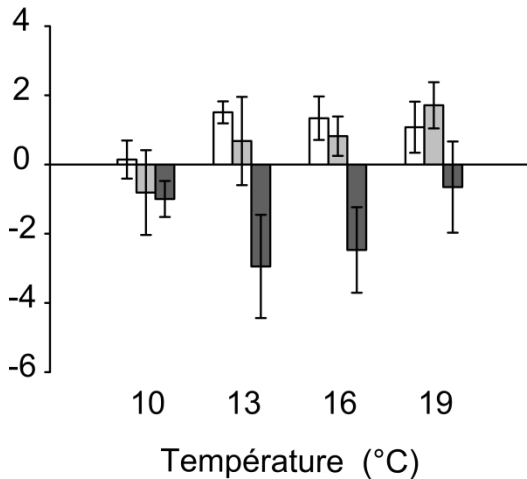


# Résultats calcification

## Animal entier



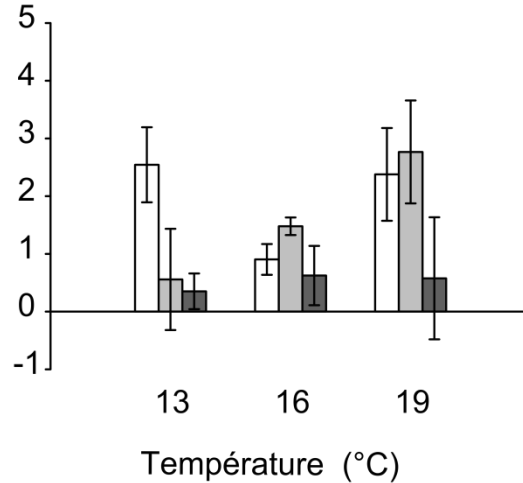
**Calcification nette**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



## Tissus mous



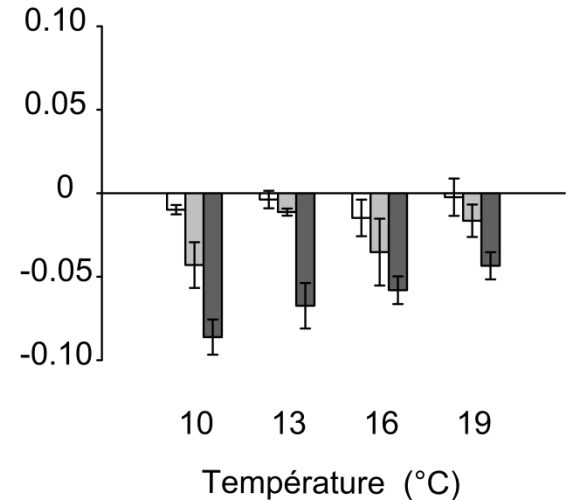
**Calcification brute**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



## Coquille seule



**Dissolution coquille**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )

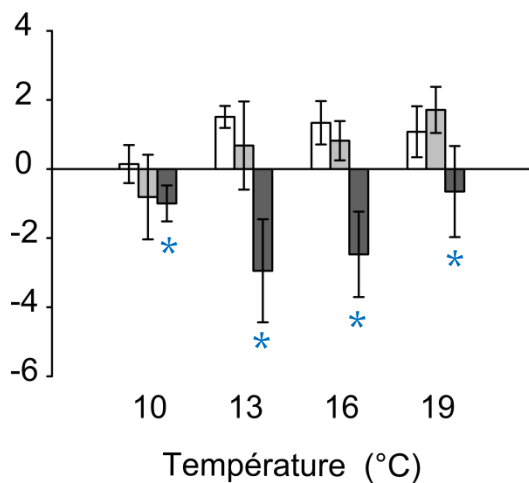




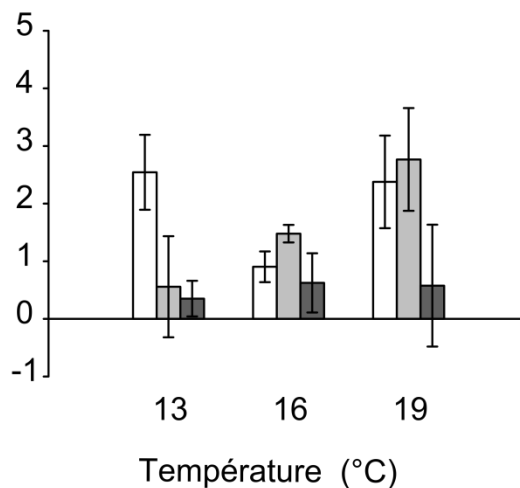
## Résultats calcification



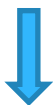
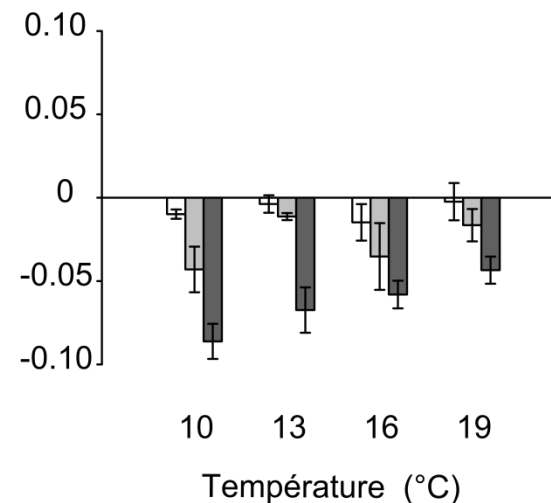
**Calcification nette**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



**Calcification brute**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



**Dissolution coquille**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



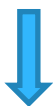
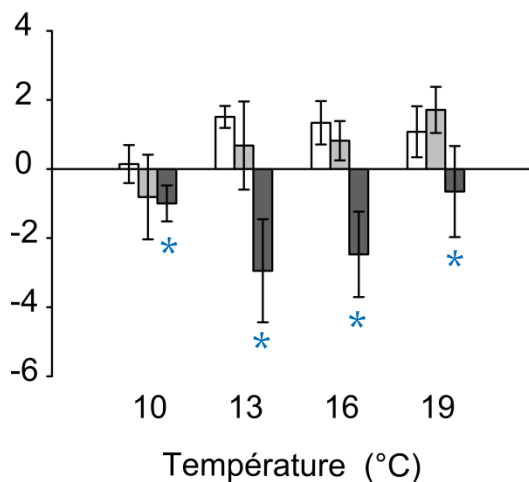
- Pas d'effet température
- ↓ calcification avec ↑  $p\text{CO}_2$
- Dissolution à 1400  $\mu\text{atm}$



## Résultats calcification



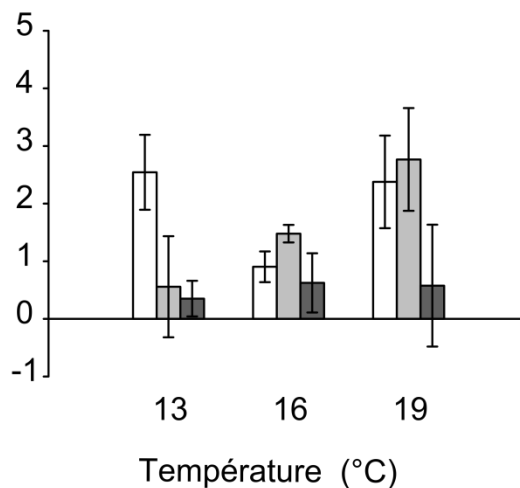
**Calcification nette**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



- Pas d'effet température
- ↓ calcification avec ↑  $p\text{CO}_2$
- Dissolution à 1400  $\mu\text{atm}$



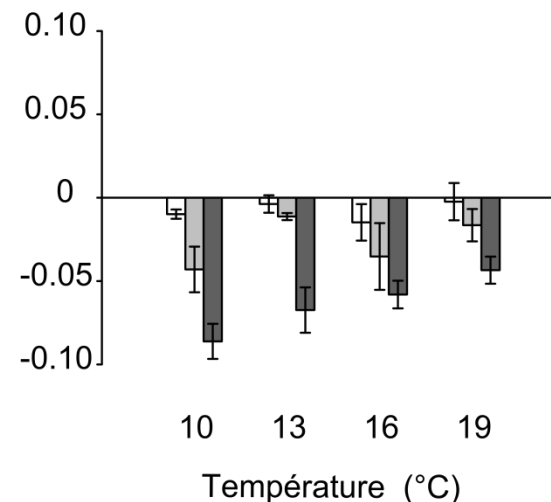
**Calcification brute**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



- Pas d'effet température
- Pas d'effet  $p\text{CO}_2$
- Calcification brute



**Dissolution coquille**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )

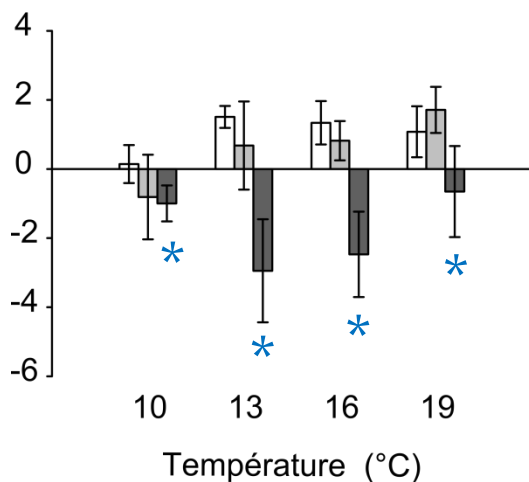




## Résultats calcification



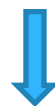
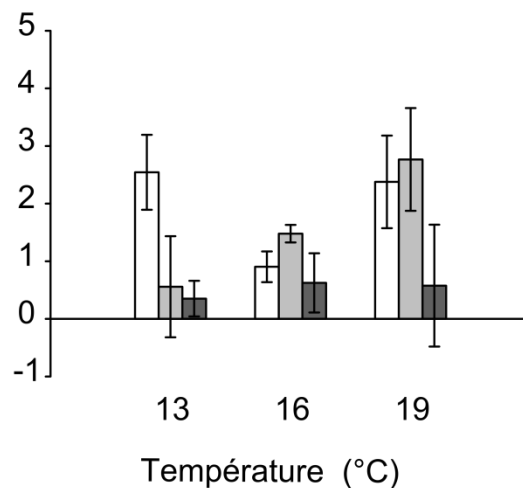
**Calcification nette**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



- Pas d'effet température
- ↓ calcification avec ↑  $p\text{CO}_2$
- Dissolution à 1400  $\mu\text{atm}$



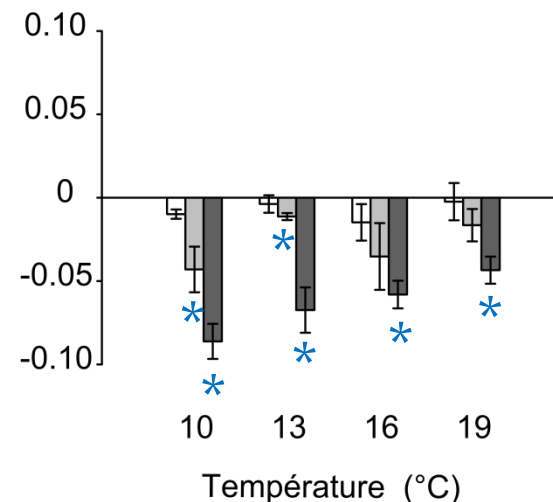
**Calcification brute**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



- Pas d'effet température
- Pas d'effet  $p\text{CO}_2$
- Calcification brute



**Dissolution coquille**  
( $\mu\text{mol CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ PS h}^{-1}$ )



- Effet température léger
- Effet  $p\text{CO}_2$
- Dissolution



## Conclusions - crépidules adultes

- Bonne résistance à l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$





## Conclusions - crépidules adultes



- Bonne résistance à l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$
- Fonctions physiologiques principalement contrôlées par la température





## Conclusions - crépidules adultes



- Bonne résistance à l'augmentation de la  $p\text{CO}_2$
- Fonctions physiologiques principalement contrôlées par la température
- Dissolution de la coquille plus importante que la calcification brute



Dissolution

>



Calcification brute

→

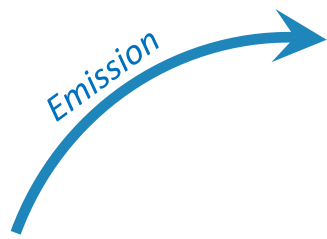


↓ calcification nette

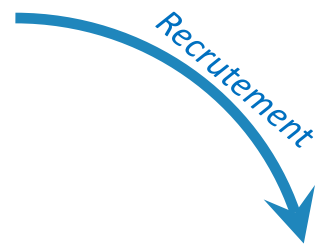


# Cycle de vie de la crépidule

COLONNE D'EAU



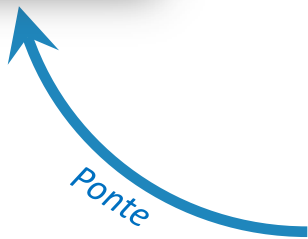
Larves velligères



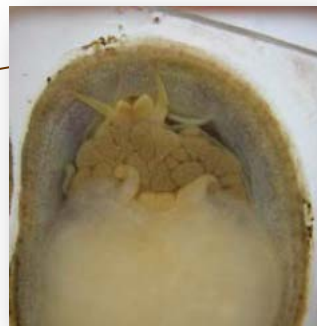
Juvéniles



Adultes en chaine



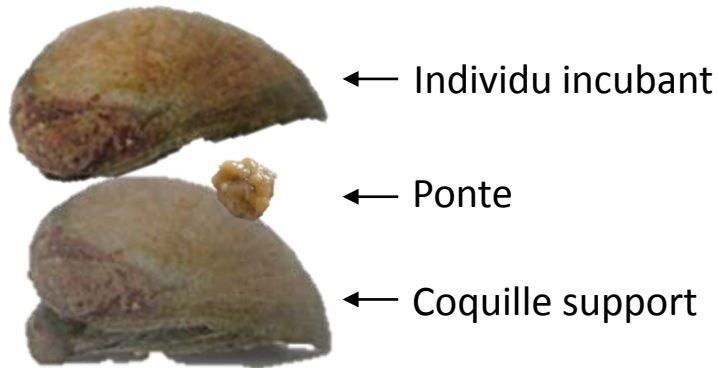
Embryons dans capsules



FOND



## Quels sont les impacts de l'acidification des océans sur les embryons et les larves de la crépidule?



→  
émission





# Incubation des embryons



→  
émission



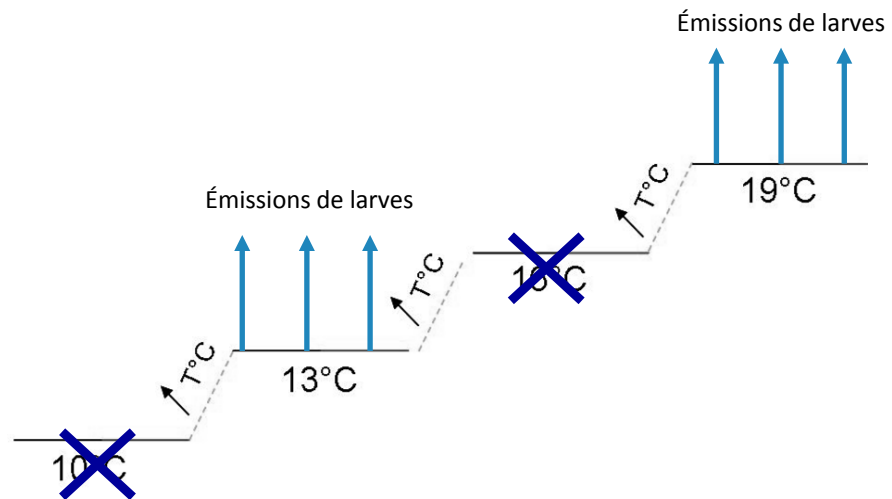
Développement capsulaire  
à différentes  $p\text{CO}_2$

**$p\text{CO}_2$**

390  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  8,1)

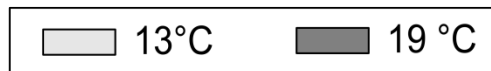
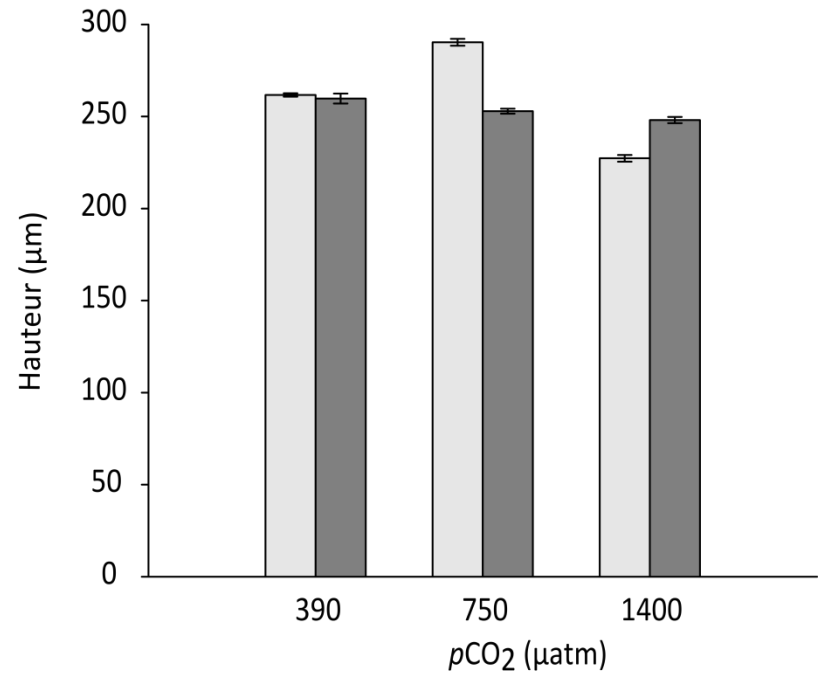
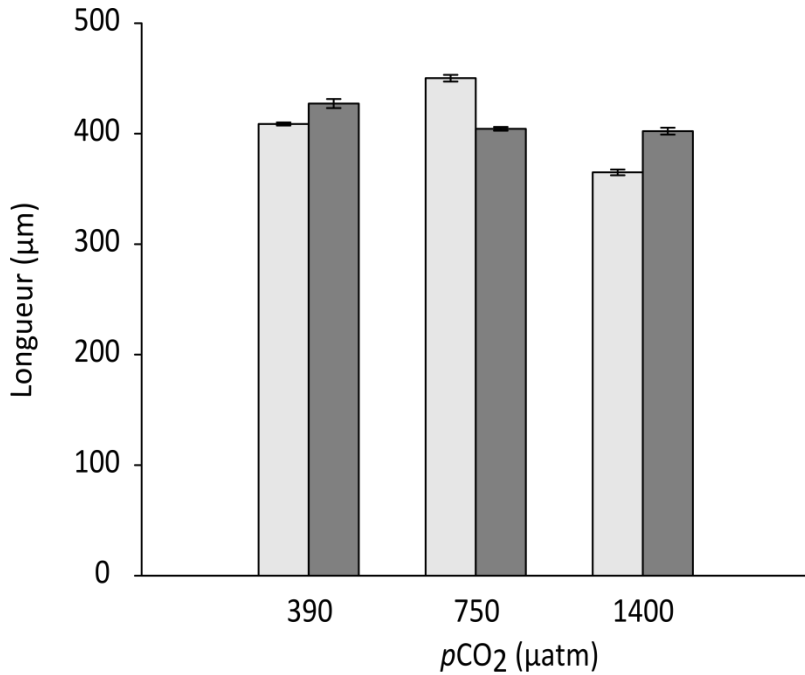
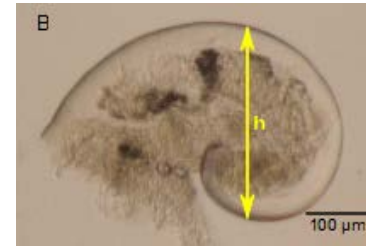
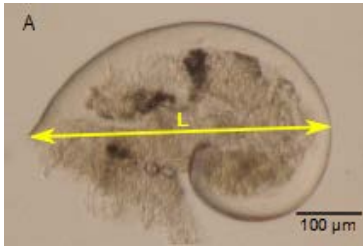
750  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,9)

1400  $\mu\text{atm}$  ( $\text{pH}_T$  7,6)



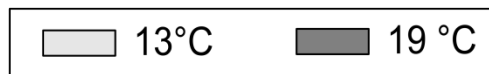
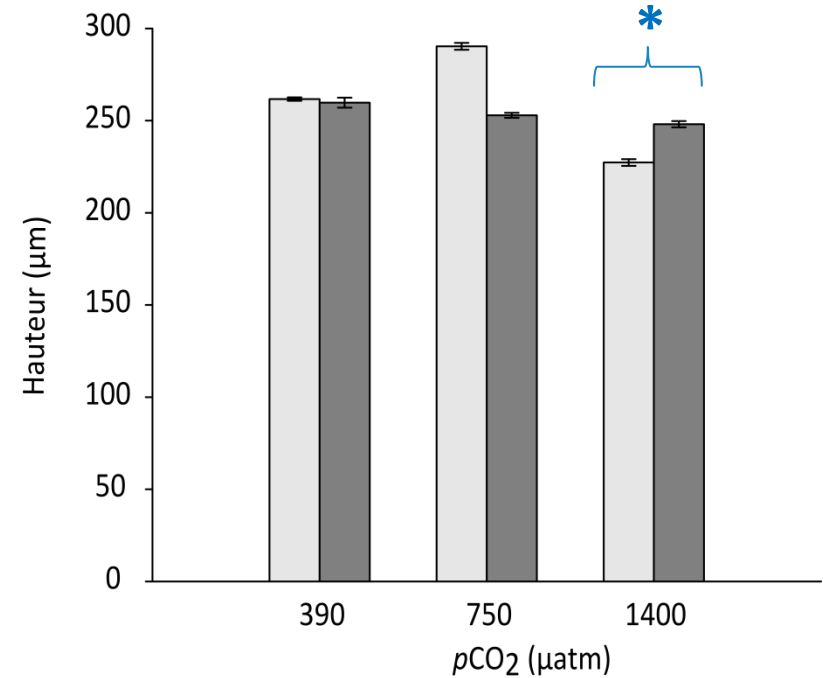
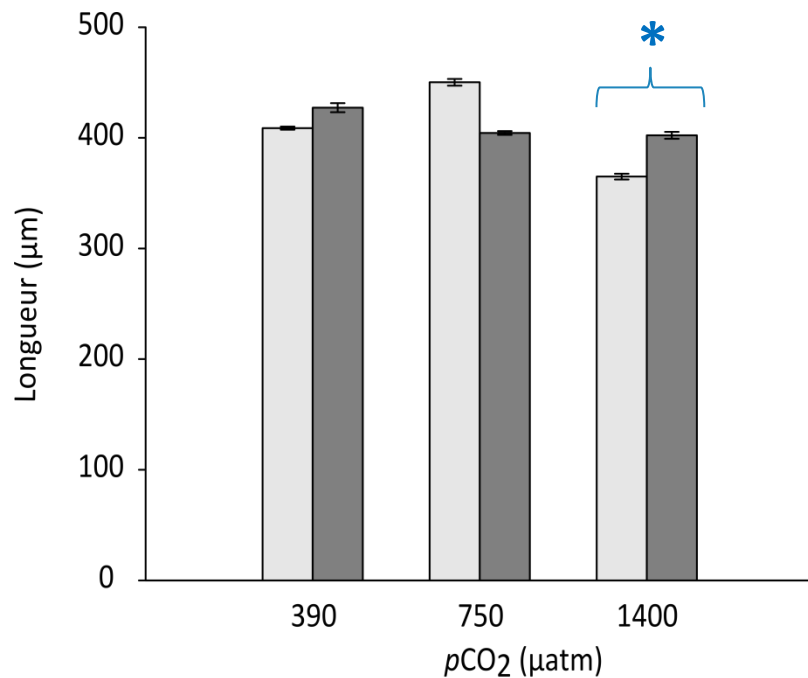
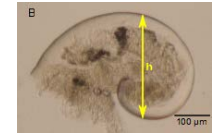
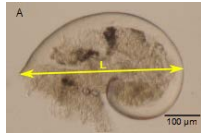


## Mesures morphométriques des larves à l'émission





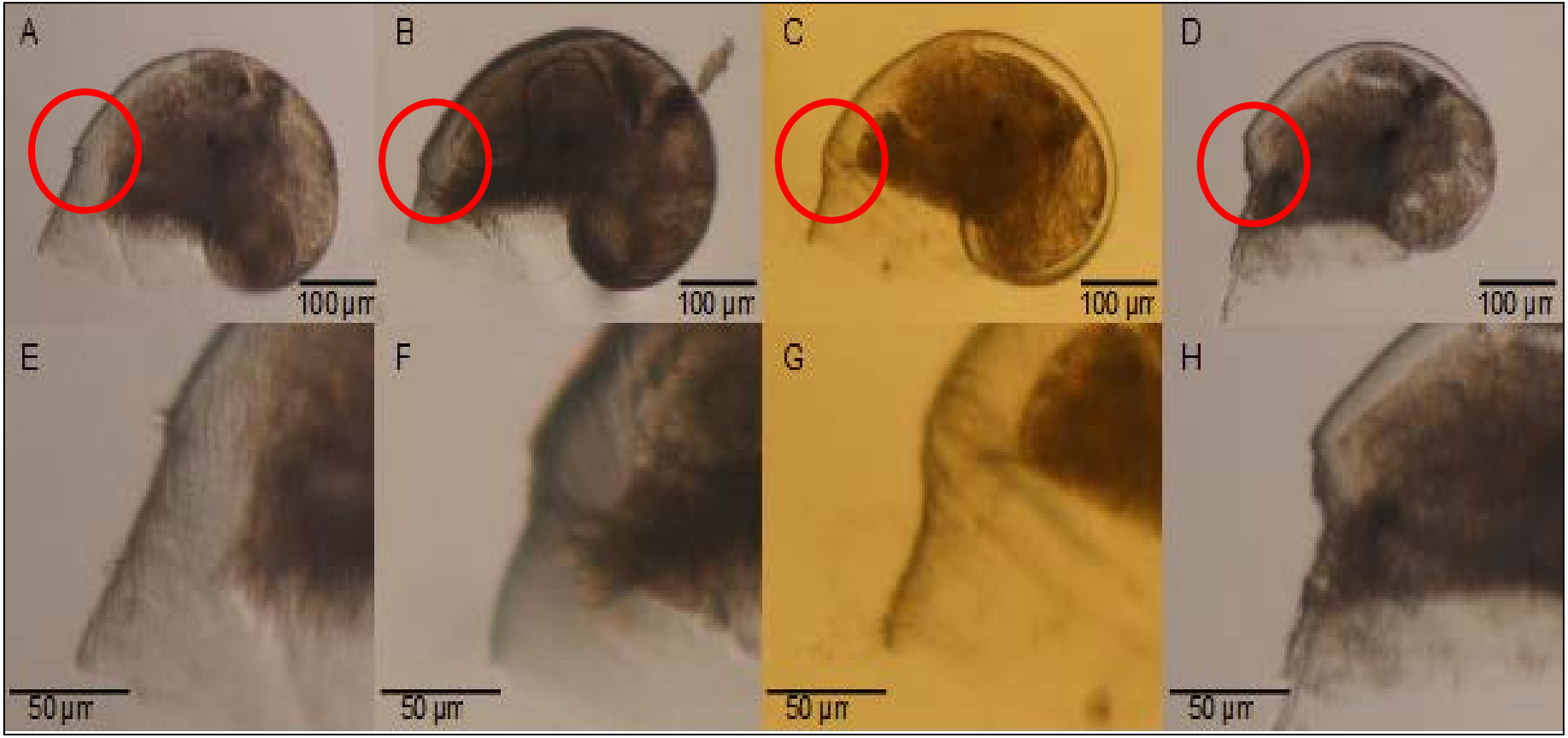
## Mesures morphométriques des larves à l'émission



- Diminution taille avec  $p\text{CO}_2$
- Interaction potentielle avec la température

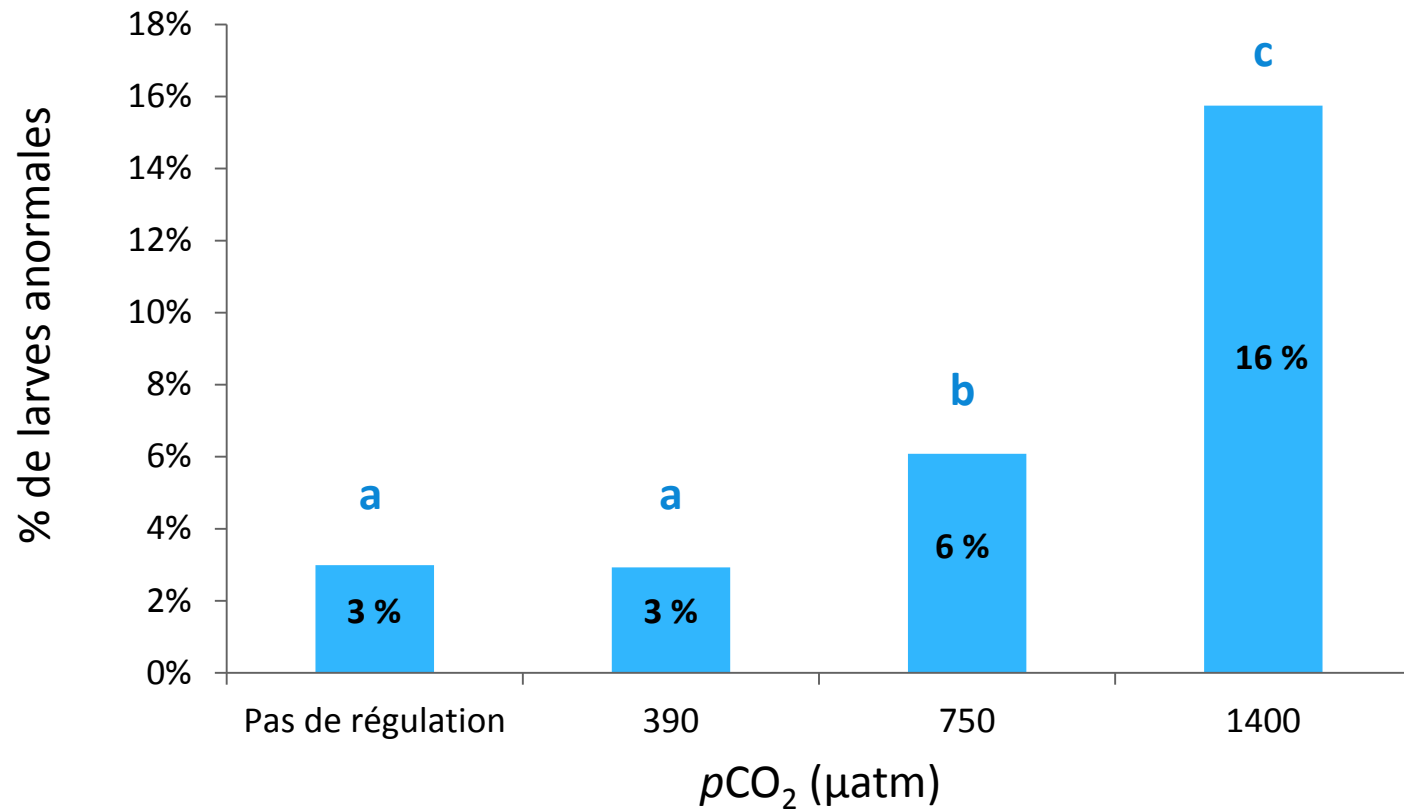


# Anomalies des coquilles larvaires





## Anomalies des coquilles larvaires

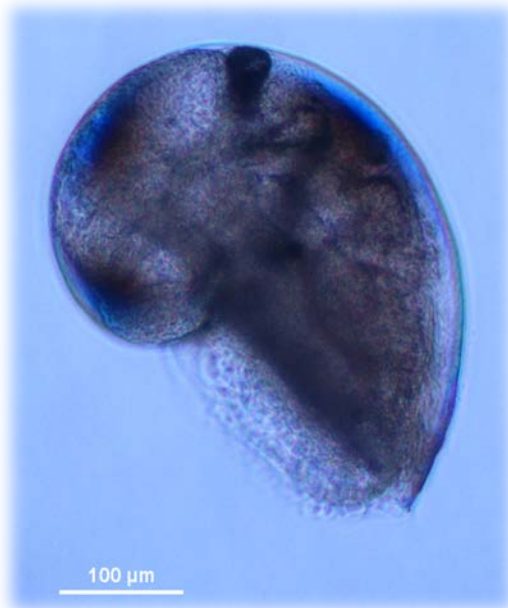


➤ Augmentation des anomalies avec la  $p\text{CO}_2$

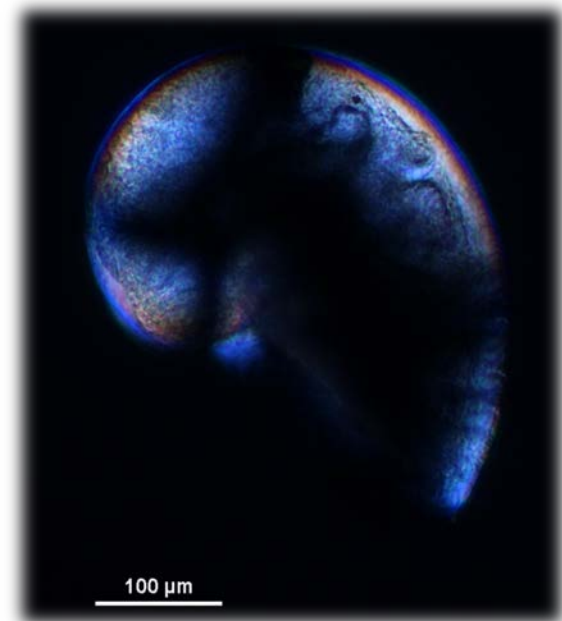




## Calcification des coquilles larvaires



Lumière normale

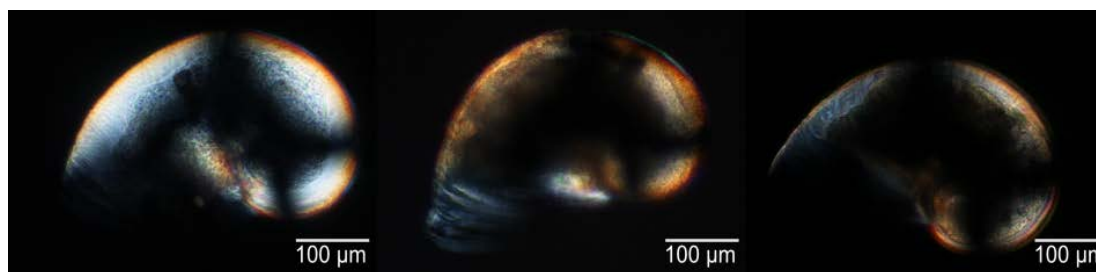
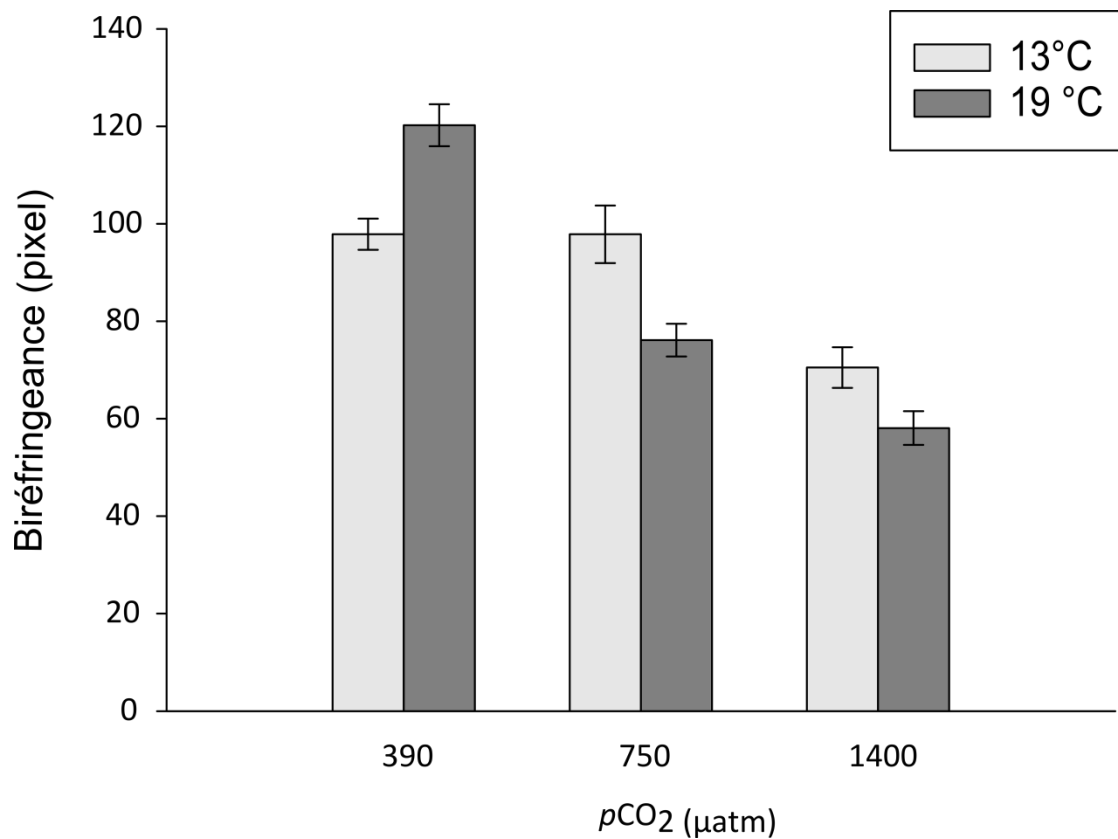


Lumière polarisée

**Intensité de la biréfringence comme proxy de calcification**

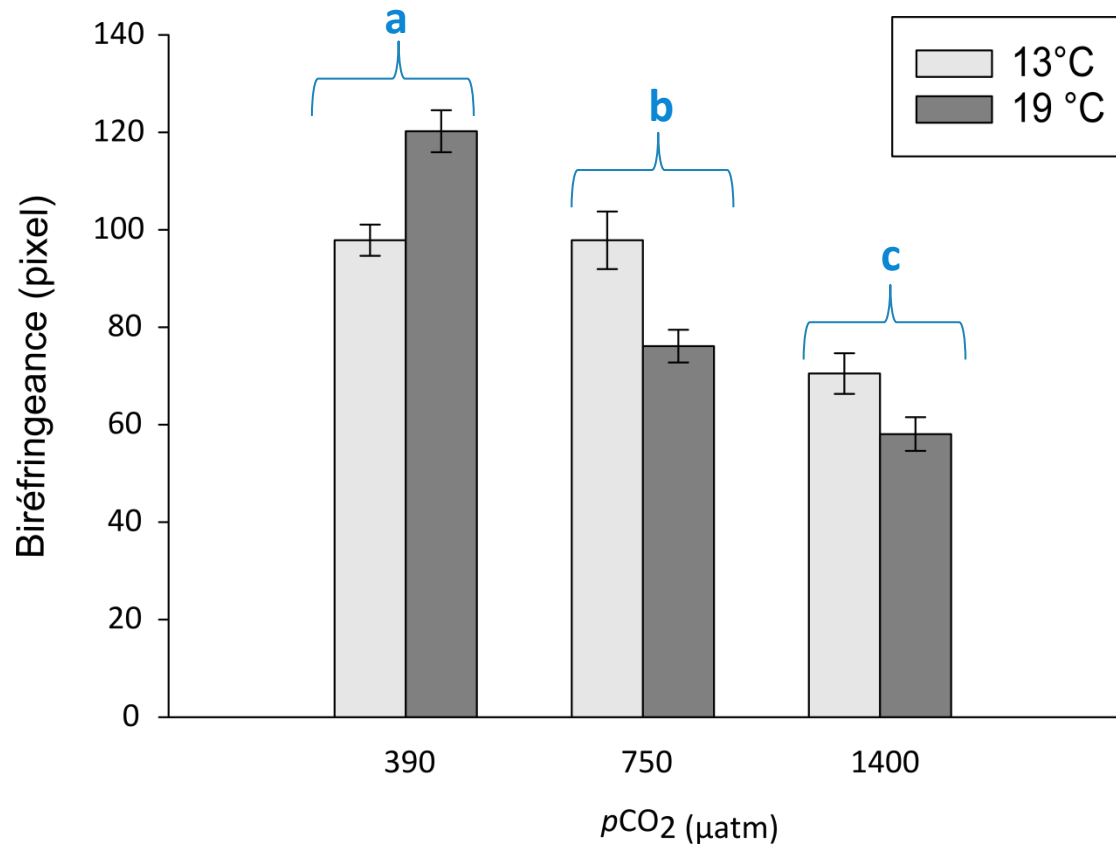


## Calcification des coquilles larvaires





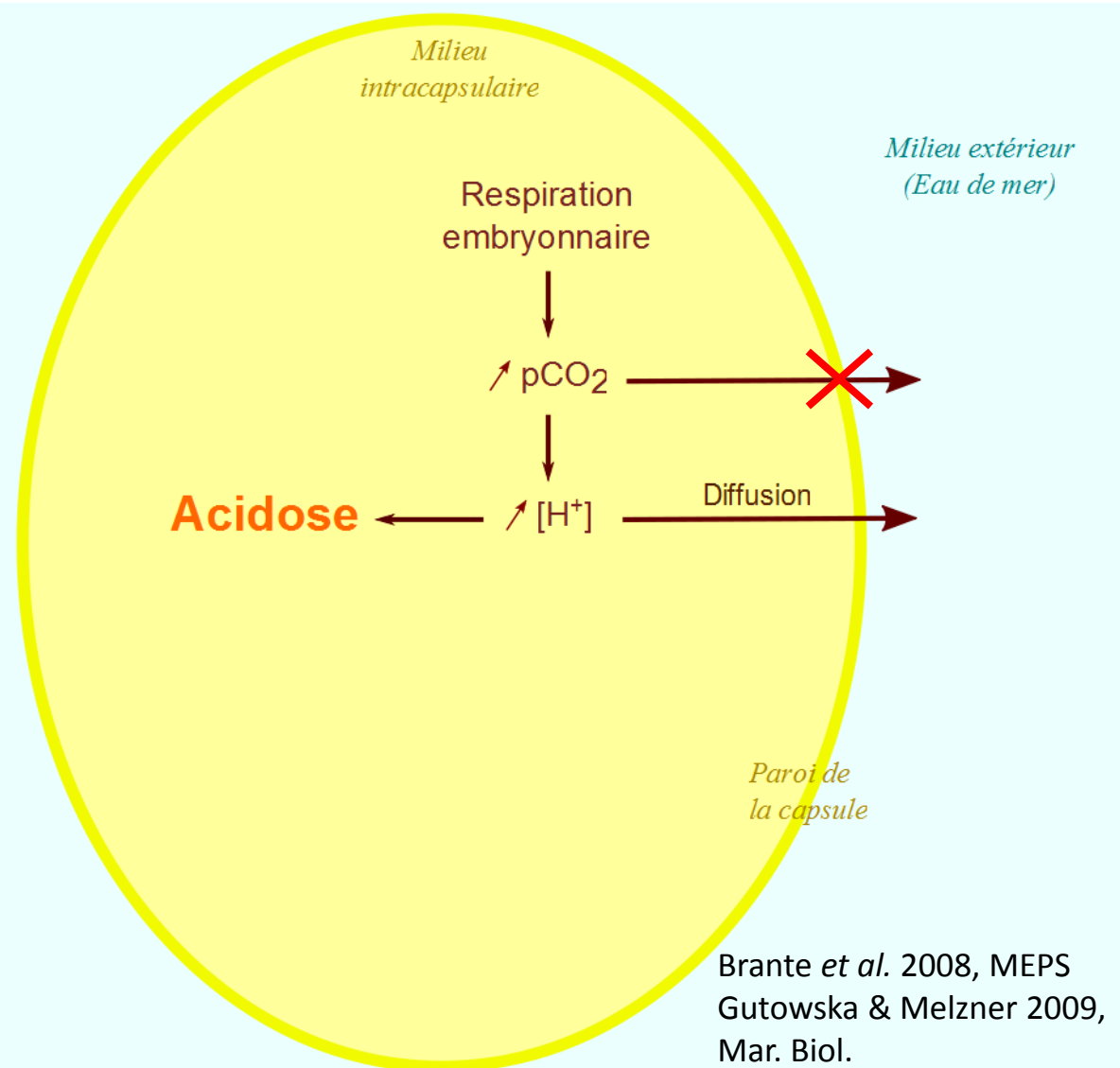
## Calcification des coquilles larvaires



- Effet  $p\text{CO}_2$
- Pas d'effet  $T^\circ\text{C}$
- Interaction des 2 facteurs

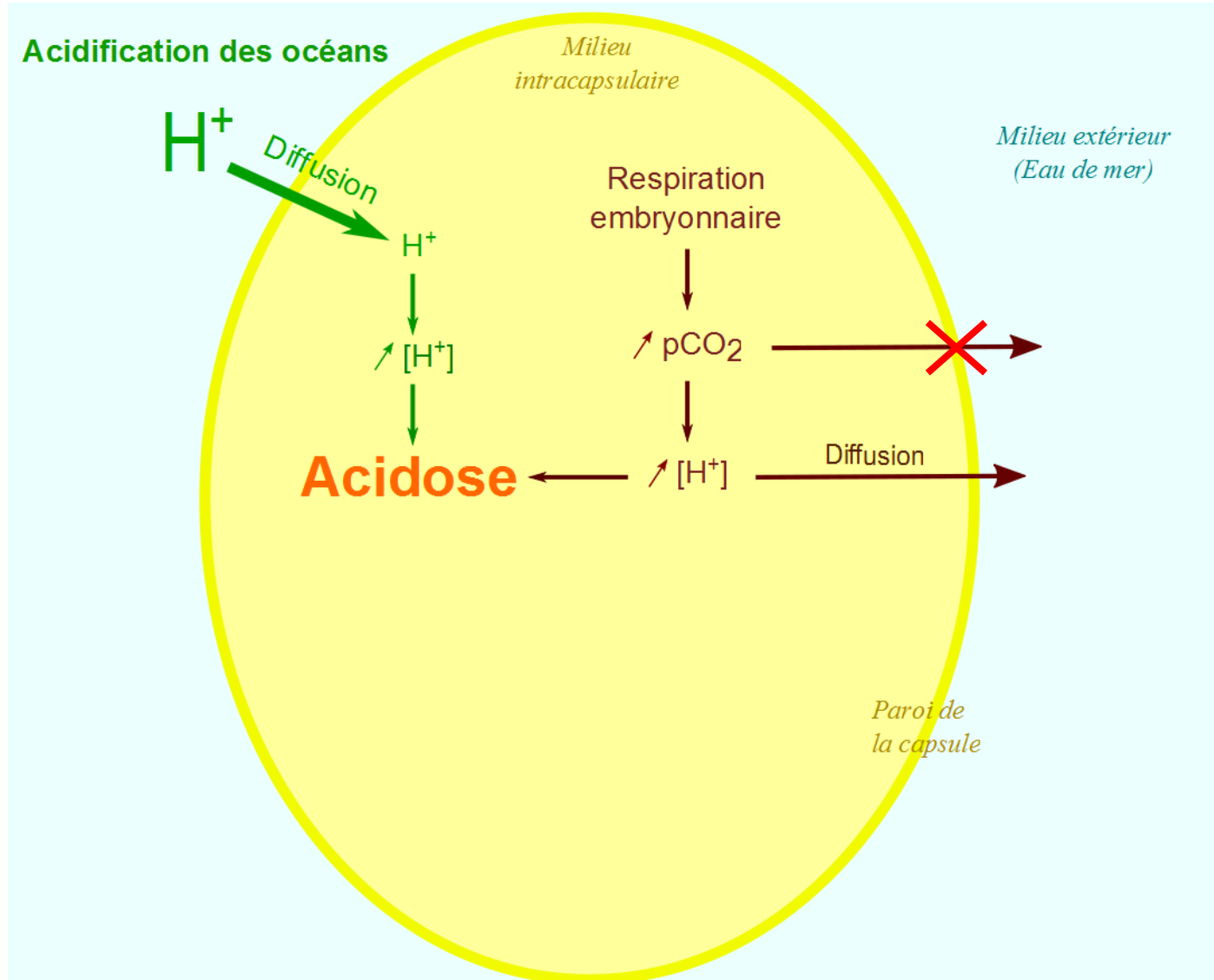


## Réactions intracapsulaires ?



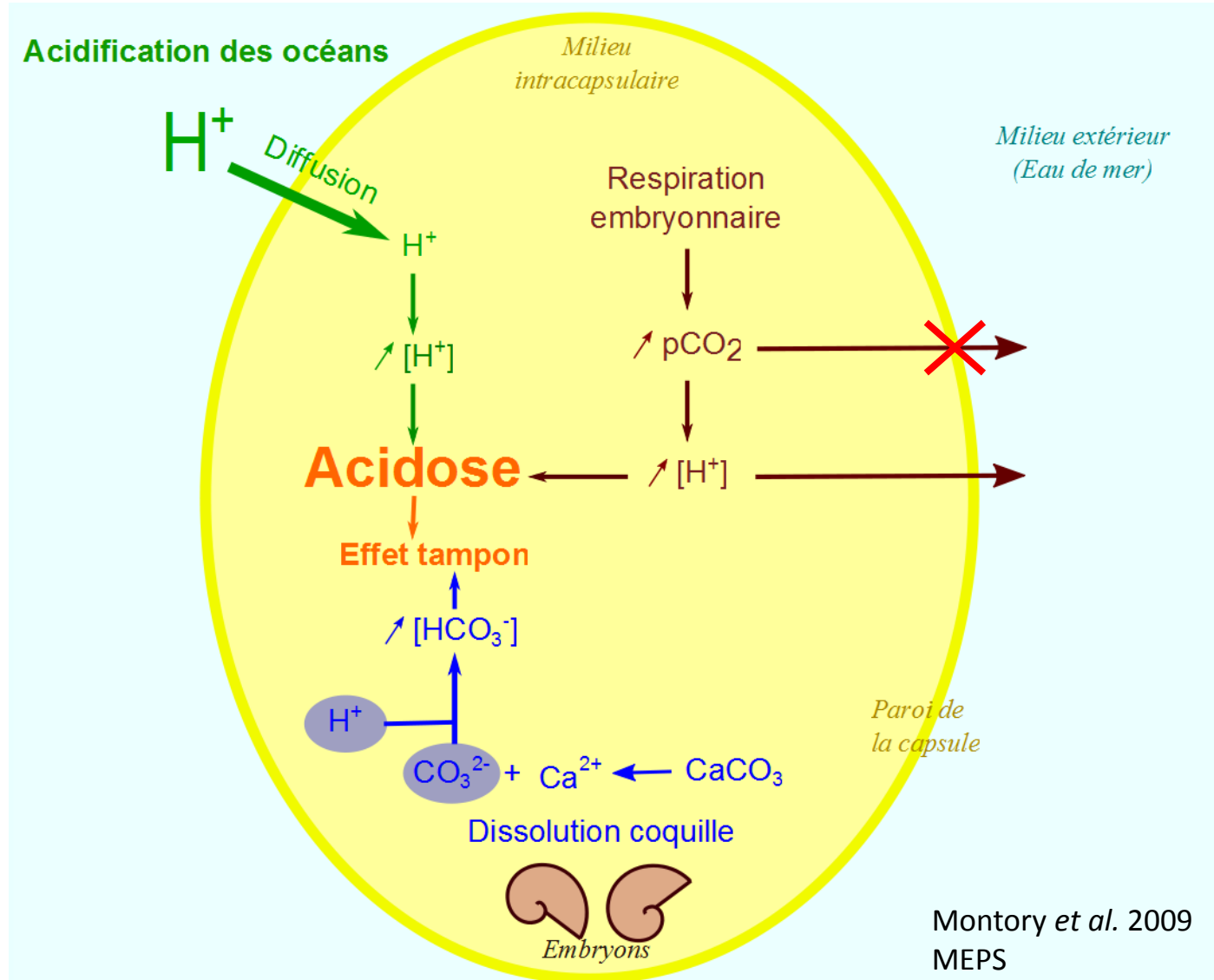


## Réactions intracapsulaires ?



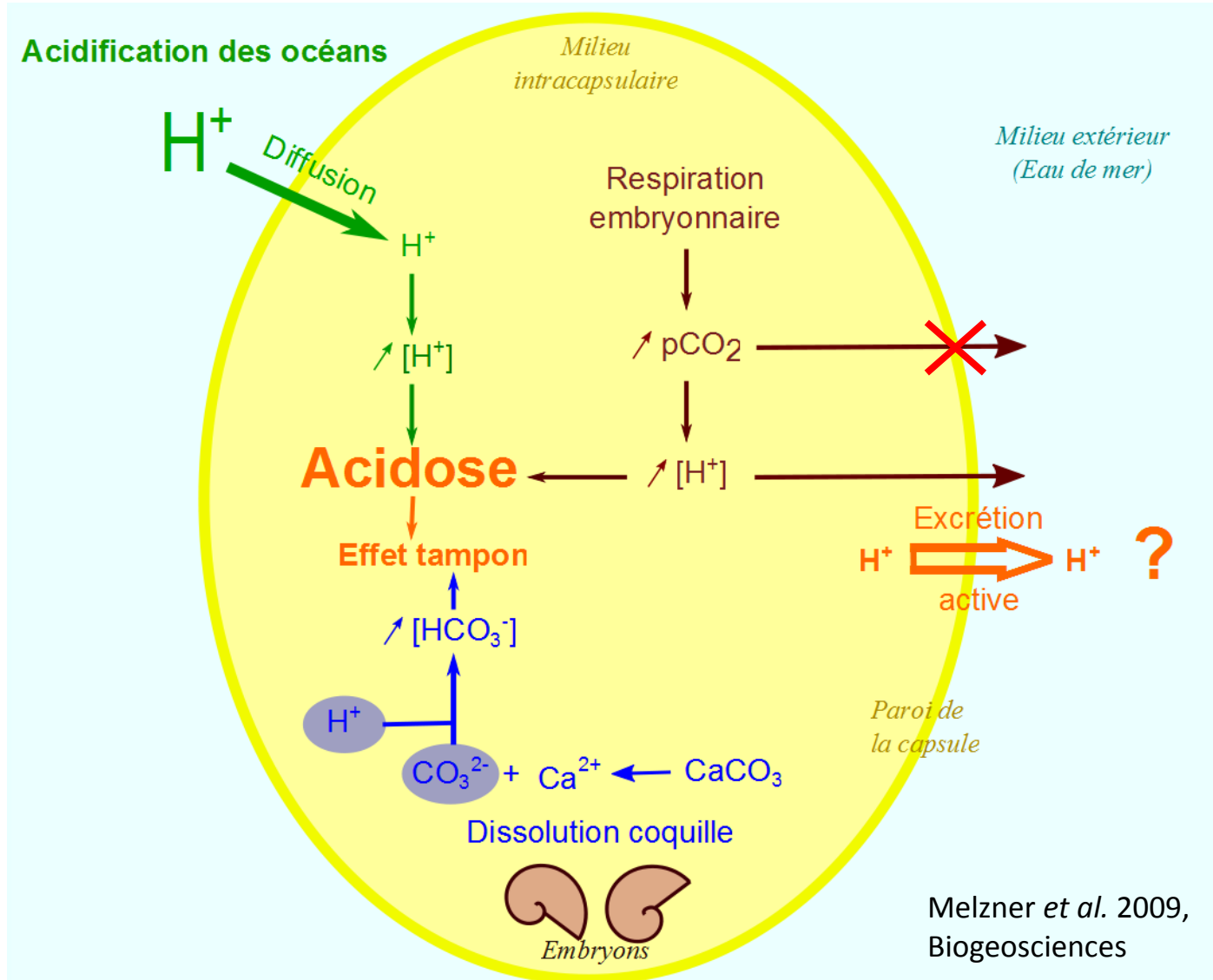


# Réactions intracapsulaires ?





# Réactions intracapsulaires ?





## Conclusions - larves crépidule



- Diminution de la taille à l'émission avec la  $p\text{CO}_2$





## Conclusions - larves crépidule



- Diminution de la taille à l'émission avec la  $p\text{CO}_2$
- Calcification impactée par la  $p\text{CO}_2$



## Conclusions - larves crépidule



- Diminution de la taille à l'émission avec la  $p\text{CO}_2$
- Calcification impactée par la  $p\text{CO}_2$
- Exposition aux conditions hypercapniques de la capsule confère peut être une résistance aux jeunes phases de vie de cette espèce

## Études monospécifiques



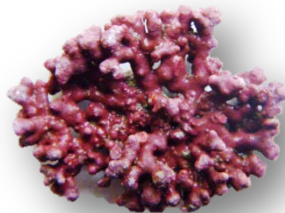
Approches écophysiologiques

Meilleure connaissance des réponses spécifiques à l'espèce

Prise en compte des différentes phases du cycle de vie

Extrapolations aux populations

### Réponses à l'augmentation de la $p\text{CO}_2$



Espèce sensible

Calcification très impactée

Couplage photosynthèse-calcification

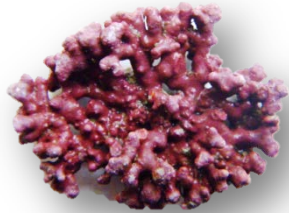


Espèce résistante

Calcification impactée

Régulation interne

## Extrapolation aux populations



Taux à  
 $p\text{CO}_2$  actuelle :  $380 \mu\text{atm}$   
 $p\text{CO}_2$  future:  $1000 \mu\text{atm}$

Densité  
13 kg PS  $\text{m}^{-2}$



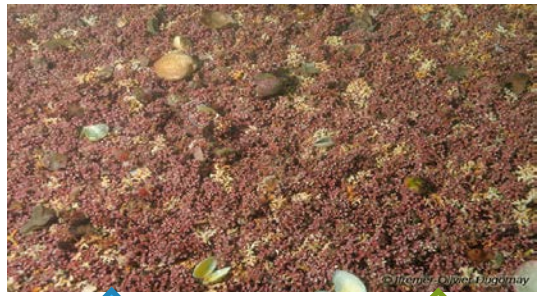
Taux à  
 $p\text{CO}_2$  actuelle :  $390 \mu\text{atm}$   
 $p\text{CO}_2$  future:  $1400 \mu\text{atm}$

Densité  
1400 individus  $\text{m}^{-2}$



# Extrapolation aux populations

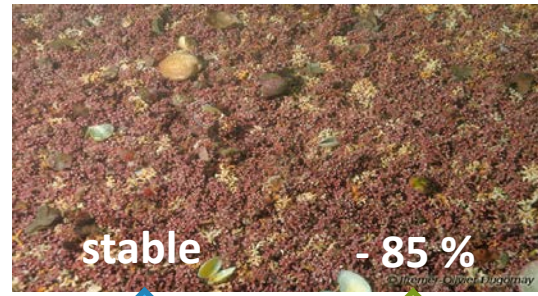
**$p\text{CO}_2$  actuelle**



Production primaire  
218 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

Production CaCO<sub>3</sub>  
2.5 kg CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

**$p\text{CO}_2$  future**



Production primaire  
220 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

Production CaCO<sub>3</sub>  
0.4 kg CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>



CO<sub>2</sub> libéré  
310 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

Production CaCO<sub>3</sub>  
475 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>



CO<sub>2</sub> libéré  
304 g C m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

Production CaCO<sub>3</sub>  
-900 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>

## Etudes monospécifiques



Approches écophysiologicals

Meilleures connaissances des réponses spécifiques à l'espèce

Prise en compte des différentes phases du cycle de vie

Extrapolations aux peuplements



Pas de prise en compte des interactions biotiques

Difficultés de reproduire les conditions réelles du milieu

Extrapolations à la communauté difficile

## Vers l'étude des interactions biotiques en laboratoire



© F. Amice - IUEM



© Ifremer



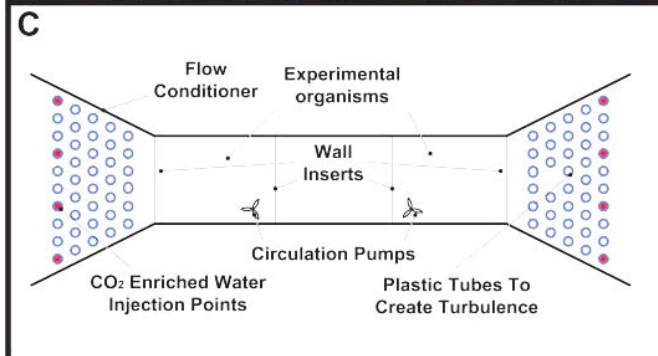
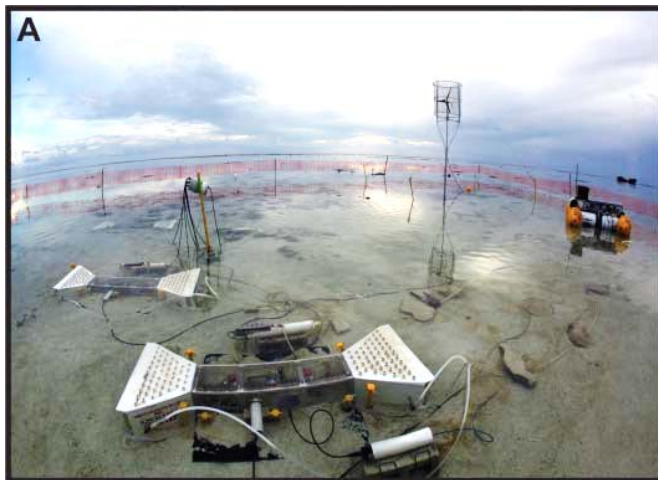
*Cryptopleura ramosa*



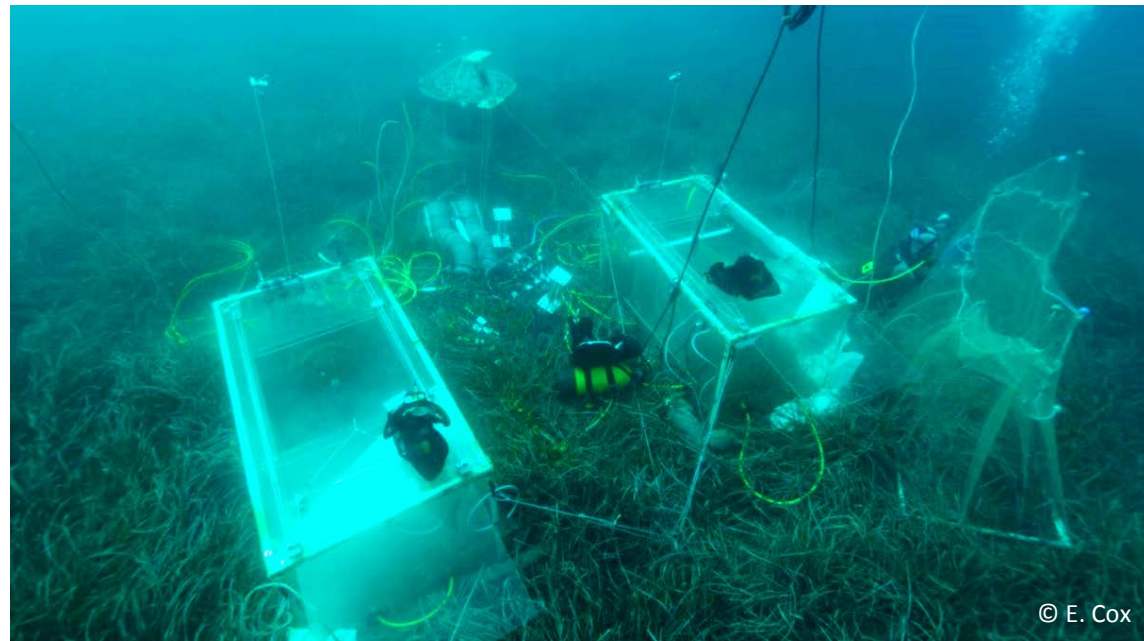
© Ifremer

# Vers l'étude des communautés *in situ*

Dispositifs FOCE: Free Ocean Carbon Enrichment



Projet CP-FOCE  
*Kline et al. 2012*



Projet E-FOCE  
(Méditerranée)

© E. Cox



# Remerciements



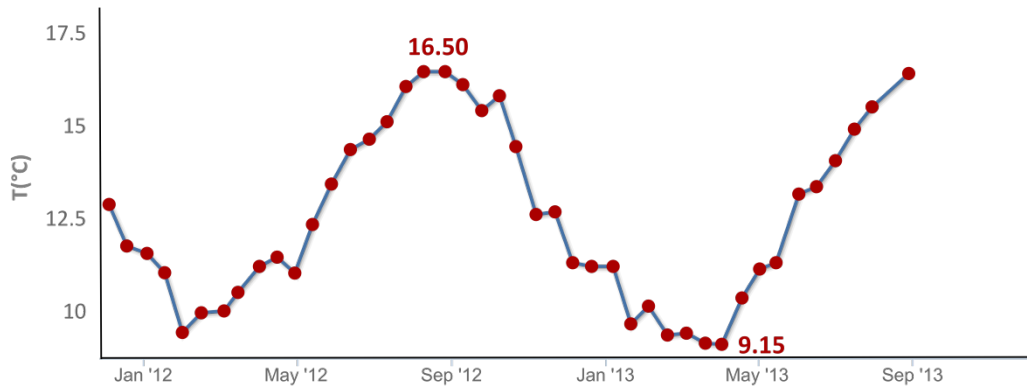
**A tous ceux qui ont contribué au bon déroulement de cette thèse,  
d'un point de vue scientifique, financier, technique, administratif et soutien moral**

**MERCI!**

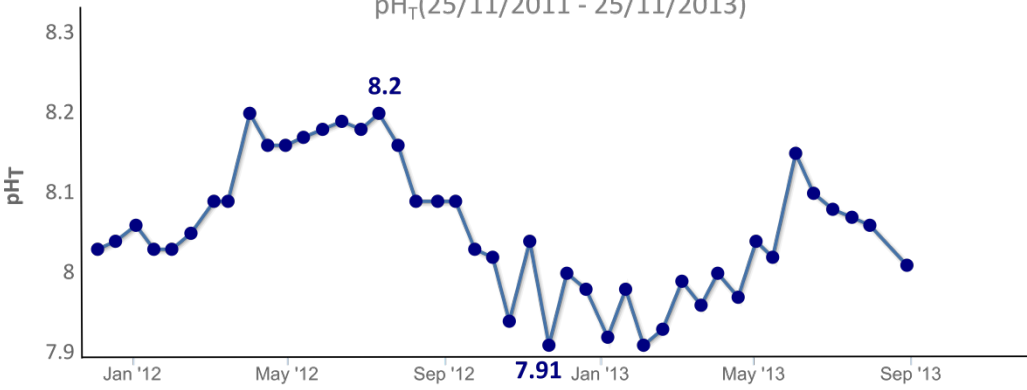
# Variabilité des paramètres du milieu côtier subtidal à l'ouest de la Bretagne

## Variabilité saisonnière Estacade – Roscoff (3m)

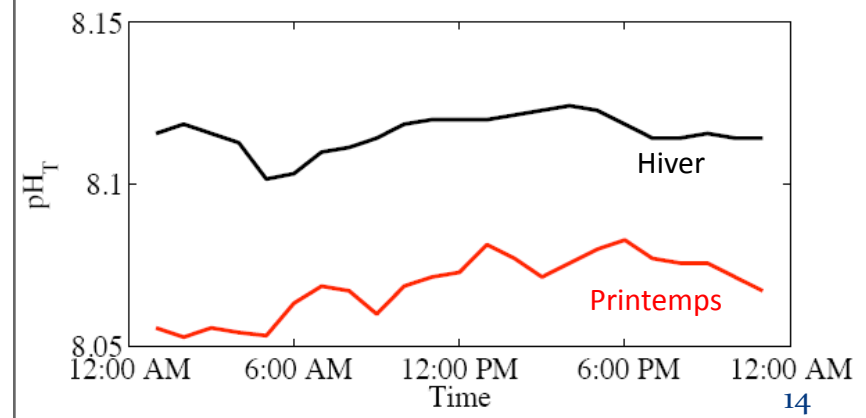
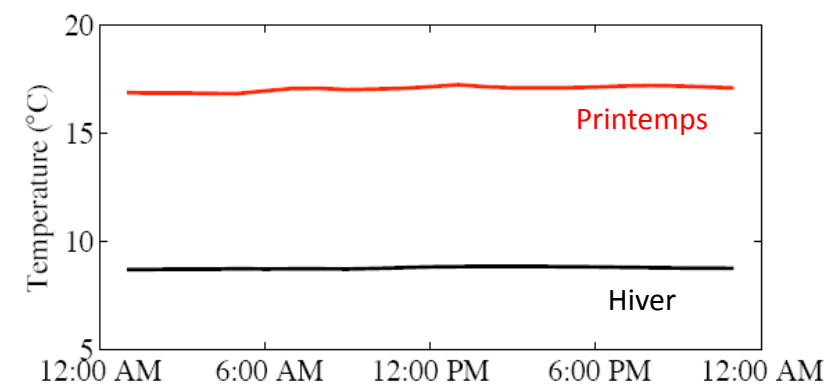
Température (25/11/2011 - 25/11/2013)



pH<sub>T</sub>(25/11/2011 - 25/11/2013)

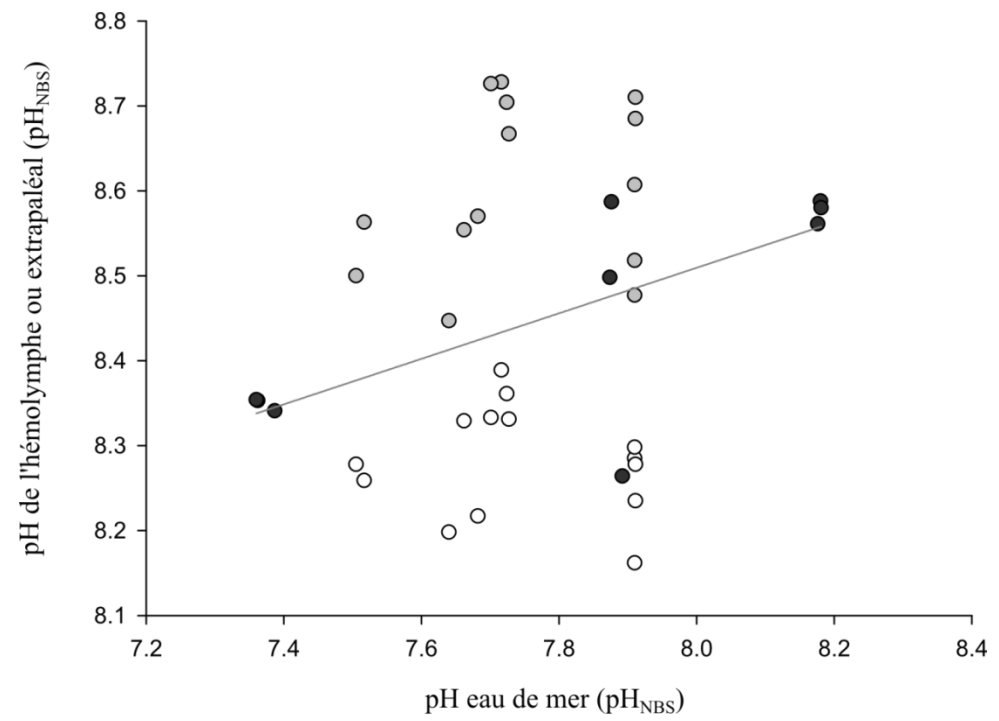


## Variabilité journalière Rade de Brest (3m)





# pHs internes



- pH de l'hémolymphe - acclimation: 6 mois
- pH du fluide extrapalléal - acclimation: 2 jours
- pH de l'hémolymphe - acclimation: 2 jours

pH hémolymphe

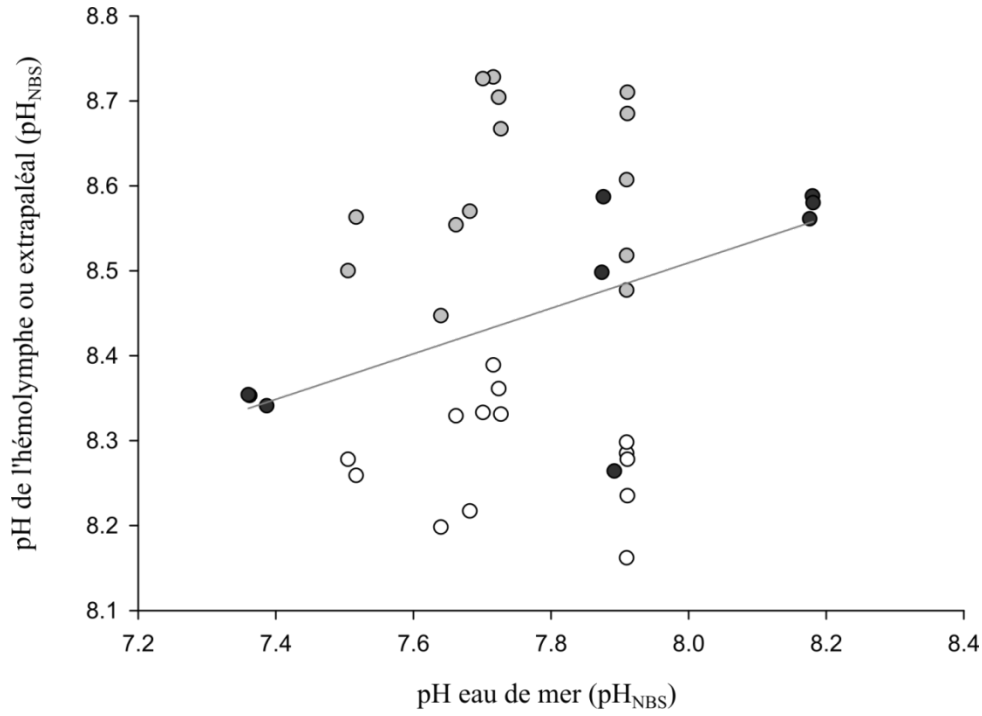


pH extrapalléal





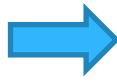
# pHs internes



- pH de l'hémolymphe - acclimation: 6 mois
- pH du fluide extrapalléal - acclimation: 2 jours
- pH de l'hémolymphe - acclimation: 2 jours



$\text{pH}_{\text{interne}} > \text{pH}_{\text{eau de mer}}$



$\text{pH}_{\text{hémolymphe}} > \text{pH}_{\text{extrapalléal}}$



Acclimation 6 mois :  
 $\text{pH}_{\text{hémolymphe}} \downarrow$