

Le Zooplancton

(méso et macro)

Pourquoi et comment l'étudier? Quel est son rôle écologique? Comment réagit-il aux cycles climatiques?

Cursus

Post-doctorat Ifremer (Dir.: M. Sourisseau et M. Huret)

- Analyse de la distribution en taille du (meso)zooplancton du golfe de Gascogne (campagnes Pelgas et Pelacus, participation à Pelgas11)
- Intégration d'une représentation en taille du zooplancton au sein du modèle ecoMARS3D

Doctorat Lab. Océano. Villefranche (Dir.: G. Gorsky, L. Stemmann et J-M. Guarini)

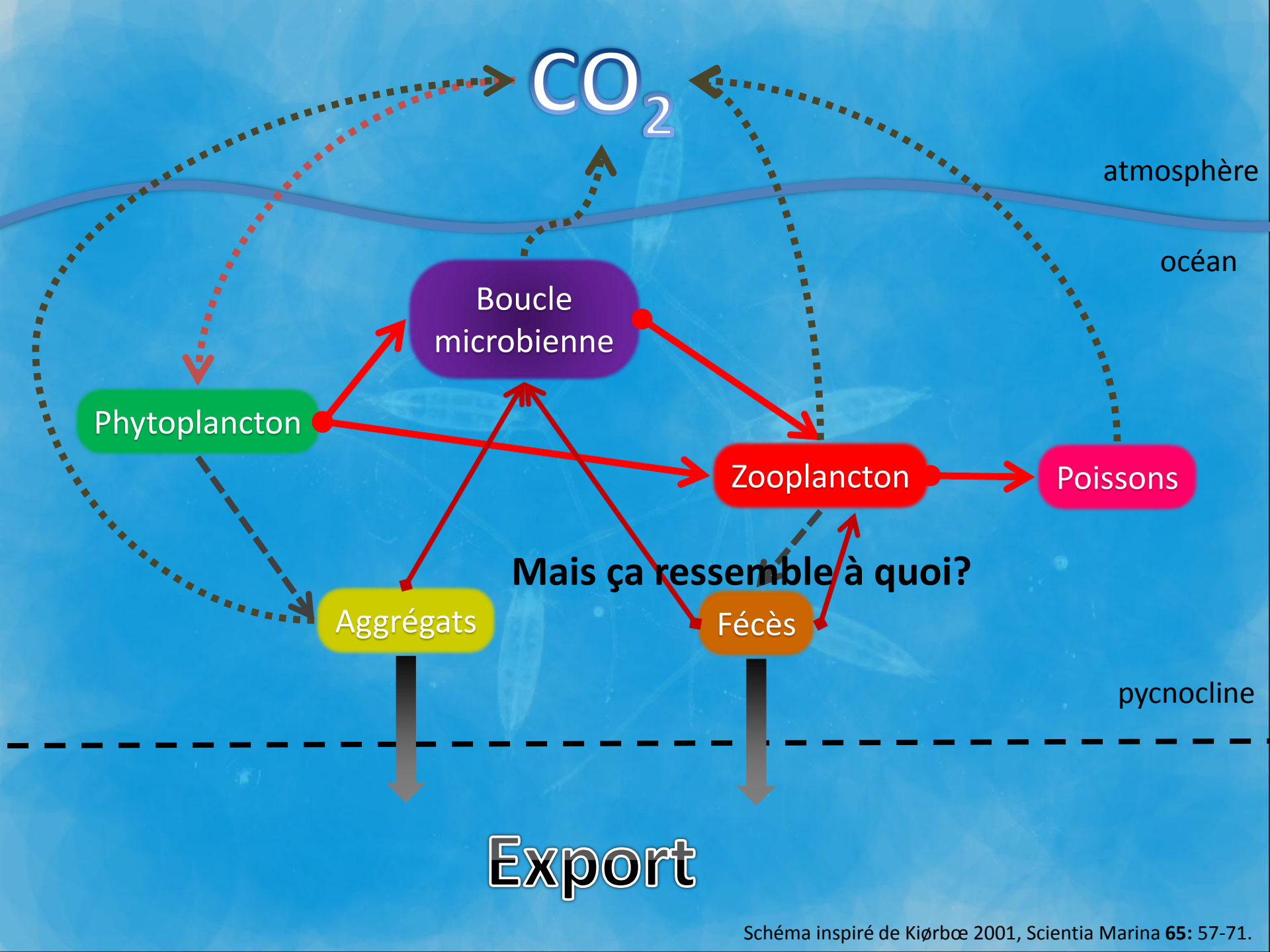
- Techniques d'imagerie du zooplancton (ZooScan et UVP)
- Liens entre fluctuations interannuelles du zooplancton et climat
- Modélisation basée en taille du zooplancton (modèle 0D)
- Participation à la campagne Lohafex (fertilisation en fer)

M2 Station Marine de Wimereux (dir.: F. Schmitt et S. Souissi)

- Analyse des trajectoires de nage d'organismes planctoniques (ciliés et copépodes)

Le plancton c'est quoi?

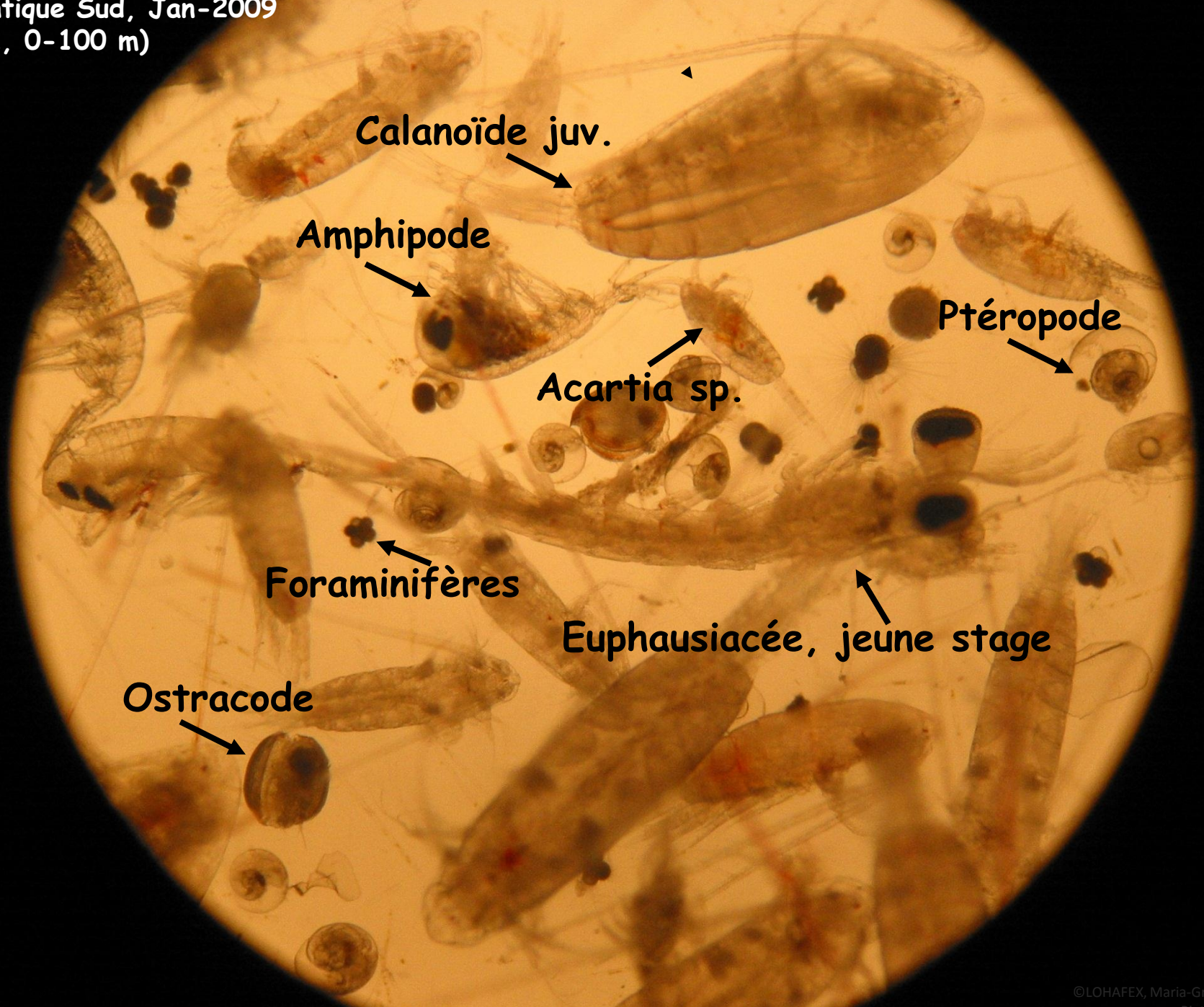
- organismes errants dans la colonne d'eau :
 - Ne peuvent lutter contre les courants (nbr. Reynolds entre 0.001 et 10)
 - (migration verticale...)
 - Tout sauf les nageurs actifs (necton):
 - poissons et céphalopodes (sauf larves), mammifères marins, tortues marines ...
 - Terme très vague ... -> beaucoup de sous-catégories:
 - Virio, (myco), bactério, phyto, zooplancton
 - Méro et holoplancton
 - Pico, nano, micro, méso, macro, mégaplancton
 - ...
- Le méso(+macro)zooplancton?
 - Hétérotrophes (200 μm à 2 cm de diamètre équivalent sphérique esd)
 - Lien entre la production primaire et le necton
 - Rôle « pivot » dans les cycles biogéochimiques →



Atlantique Sud, Jan-2009
(WP2, 0-100 m)



Atlantique Sud, Jan-2009
(WP2, 0-100 m)



Calanoïde juv.

Amphipode

Ptérope

Acartia sp.

Foraminifères

Euphausiacée, jeune stage

Ostracode

Sommaire

I. Diversité

- Spécifique et comportementale

II. Techniques d'échantillonnages

- Ex. de l'imagerie (ZooScan, UVP)

III. Influence du climat

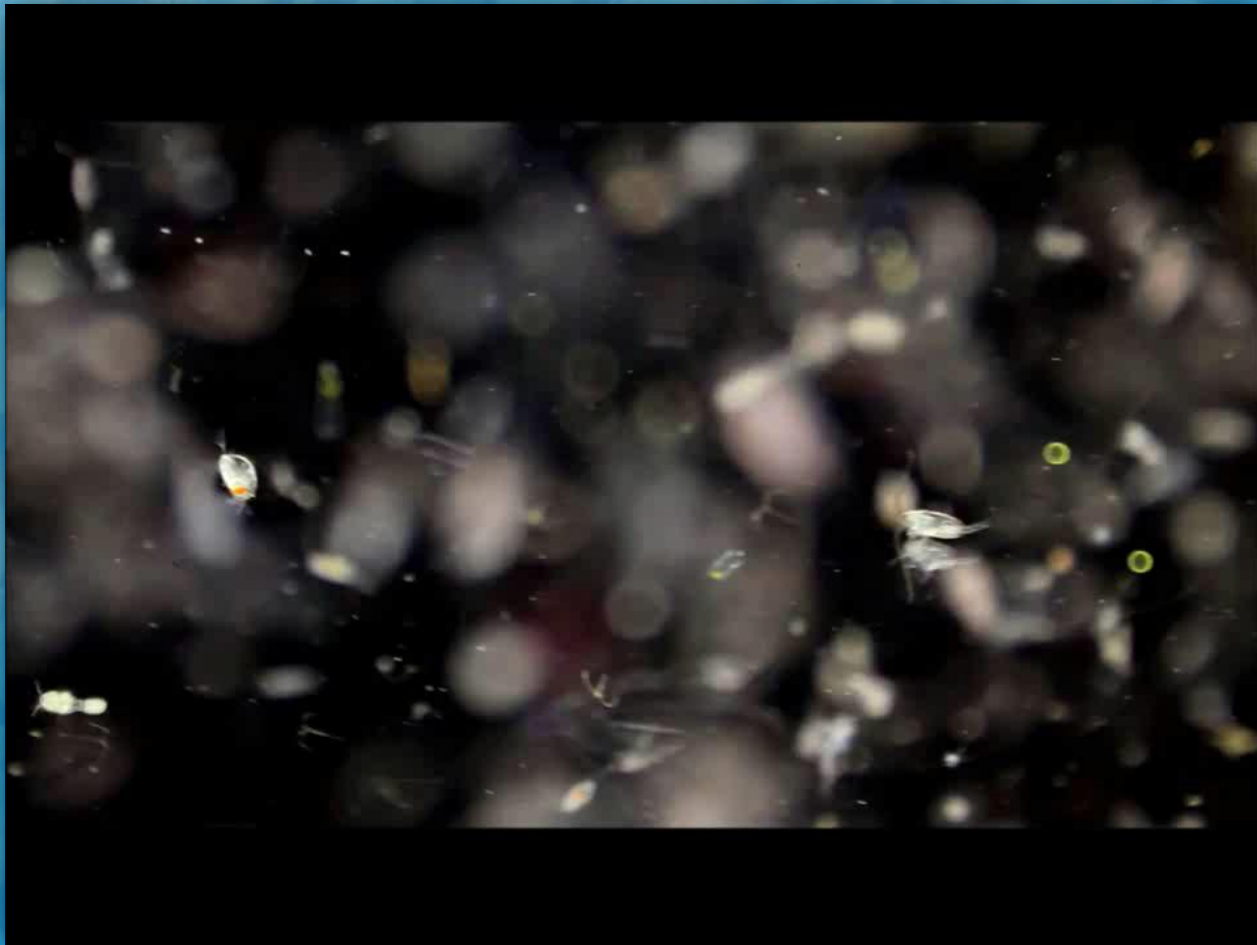
- Ex. de la mer Ligure (large de Nice)

IV. Rôles dans les cycles biogéochimiques

- Ex. de la pompe biologique: campagne LOHAFEX (fertilisation en fer)

V. Modélisation biogéochimique

- Ex. des modèles basés sur la taille



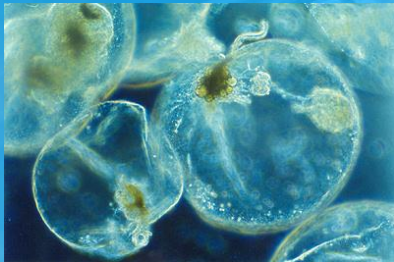
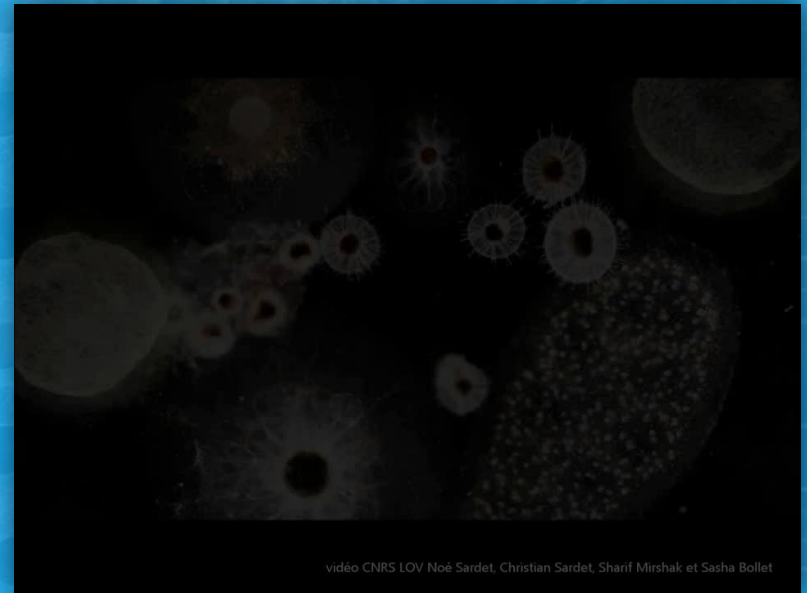
Un nombre infini de formes, de groupes et de stratégies

I. DIVERSITÉ DU ZOOPLANCTON

Protozooplancton

(dinoflagellés, radiolaires et foraminifères)

- Unicellulaires
- Hétérotrophes (voir mixotrophes...)
- Importants brouteurs
- Sédimentent -> 30% du fond océanique foram.

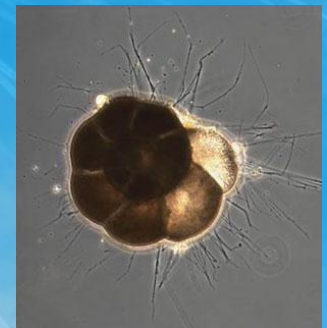


Noctiluca scintillans
(dinoflagellé)

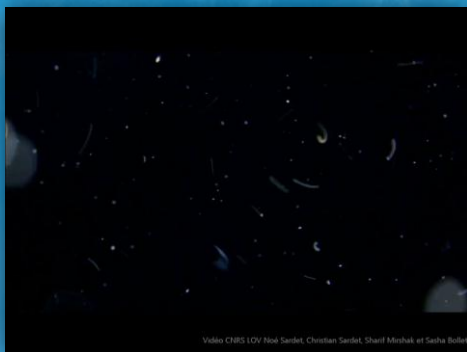
Radiolaire (acanthaire)



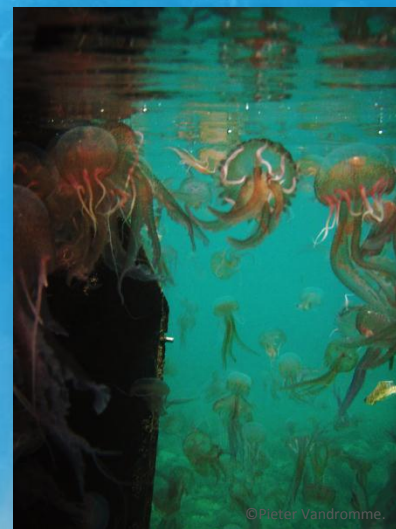
Foraminifères



Cnidaires et Cténaires



- Méduses, siphonophores, cténophores
- Prédateurs (compétiteurs de nbx poissons)
- « envahissants »



Mollusques



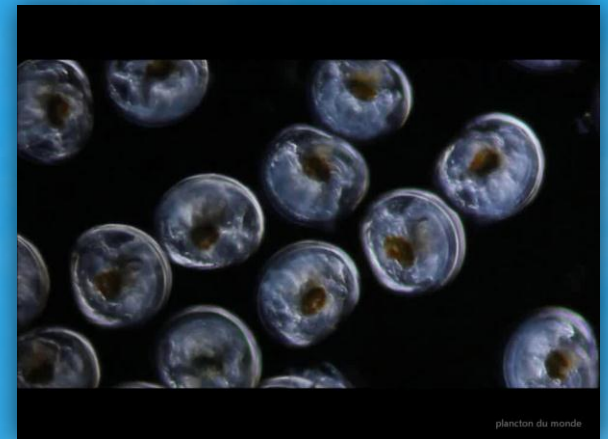
- Ptéropodes, gastéropodes, céphalopodes, Larves de mollusques benthiques
- Thécosomata (ptéropodes) sensibles à l'acidification
- Prédateur, brouteur (suspensivores)



Carinaria lemarcki : heteropoda



Jeunes calamars



Chaetognathes

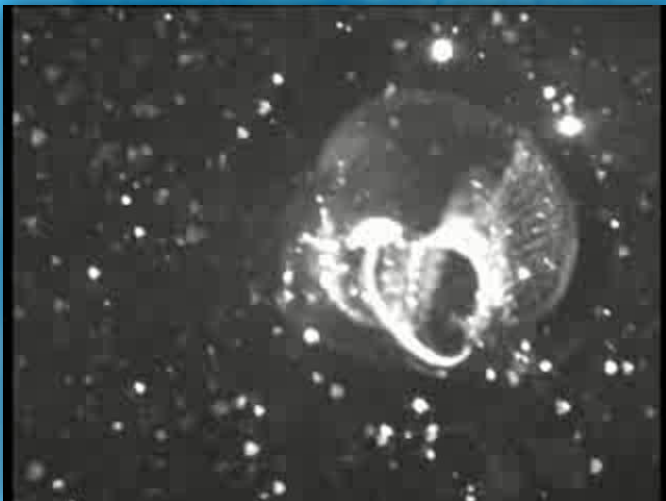
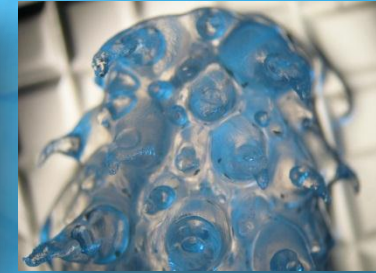
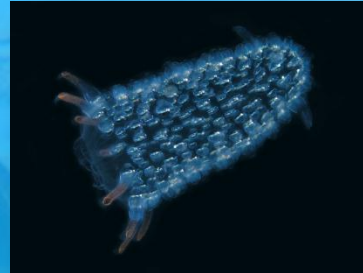


- Embranchement (division des protostomiens)
- De 2mm à 15cm
- Prédateurs visuels
- toxines



Chordés

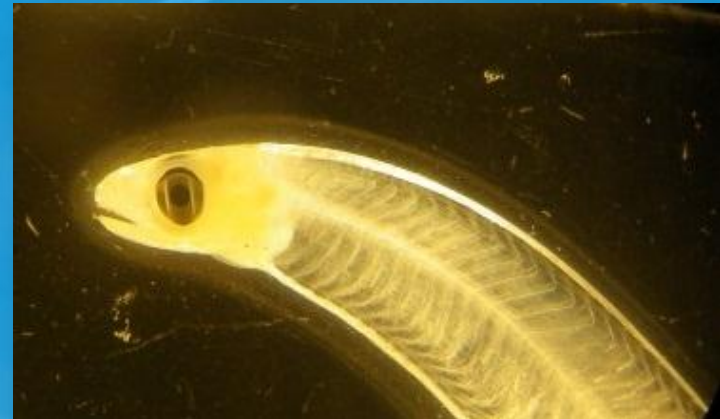
Appendiculaires, thaliacés, Céphalochordés



- Filtreurs, fèces extrêmement denses (1000m/j pour les salpes)
- Appendiculaires jusqu'à 20% du zooplancton dans le golfe de Gascogne (changent de logette 10x par jour)
- Ancêtres des vertébrés

Mais aussi...

- Annélides, larves d'échinodermes, cyphonautes (larves de bryozoaires), œufs et larves de poissons...



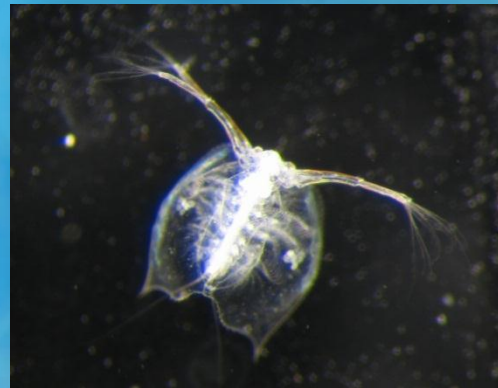
Mais surtout: les crustacés !

- Méroplancton (larves temporaires): décapodes et cirripèdes



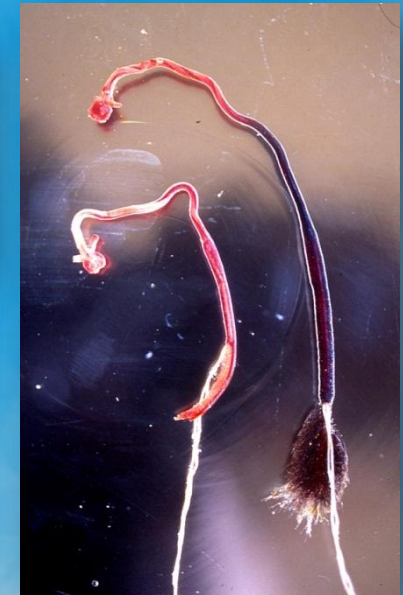
Mais surtout: les crustacés !

- Holoplancton: amphipodes, décapodes caridés, ostracodes, cladocères, mysidacés, isopodes, cumacés, euphausiacés...



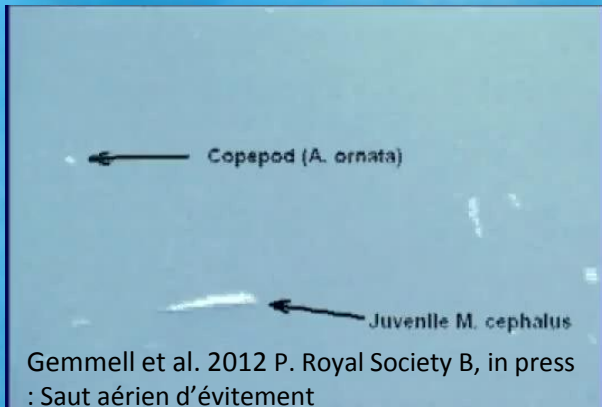
Et les copépodes (crustacés)

- Métazoaires les plus abondant de la planète
- 14000 espèces
- Présents dans les cours d'eau, fleuves, lacs, mers et océans de la surface à la fosse des Marianne...
- « Insectes des mers »
- Largement majoritaire dans le zooplancton (en moyenne 80-90% des individus)
- Adultes de 200µm de long jusqu'à 2 cm (*Calanus glacialis*), voir 30 cm (*Pennella sp.*, copépode parasite)



Et les copépodes (crustacés)

- Kiørboe 2011 « What makes pelagic copepods so successful? » J. Plankt. Res. 33:677-685



Saut d'évitement (prédateurs) ou d'attaque:

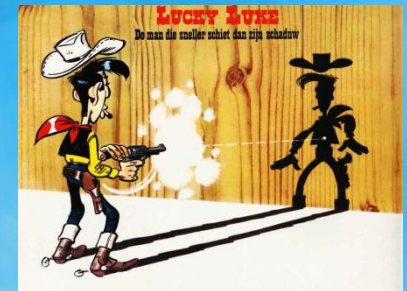
- 300x longueur/sec. (max 1000x)
 - dans un monde visqueux
 - À taille humaine: vitesse max instantanée de 6000km/h
- Muscles les plus denses du règne animal
- Par rapport à la taille :
 - Record mondial de vitesse
 - Record mondial de force

Oithona davisae
ambush feeding

270 x real time

Arsenal de chémodétection et stratégies alimentaire:

- « Ambush feeding » et « scanning current feeding »
 - détection chimique des proies
 - Rapidité d'attaque : The « Lucky Luke Effect »



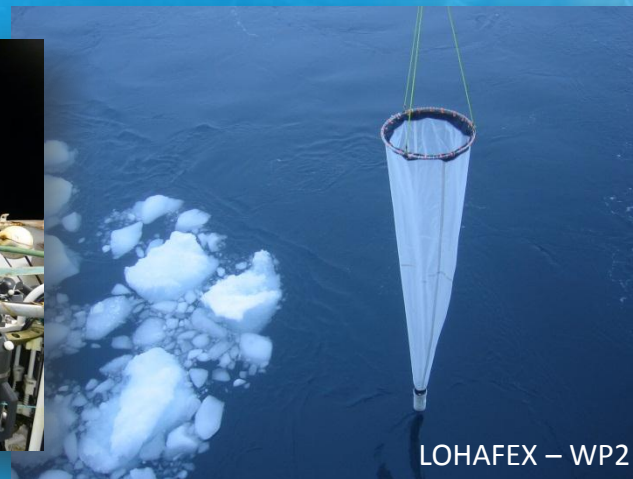
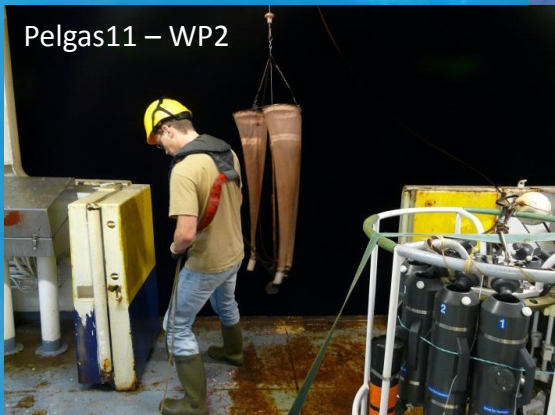


Que mesurons nous? La difficile tache d'observer un monde « invisible »...

II. TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGES

Filets et microscope: les fondamentaux

- Hensen net (1880 - 2012)
- Nouveaux filets ± pareils:
 - mesure plus précise du flux entrant
 - Ouverture / fermeture à des prof. préprogrammées
 - Soie remplacée par du nylon (pb gélatineux)
 - vide de maille de 20 μ m à 5mm
 - ex: WP2 / Multinet



pb inhérents aux filets : échappement, sous estimation des petites tailles, floculation, destruction des individus fragiles, désagrégation des détrit...

Filets et microscope: les fondamentaux

- Microscope optique / loupe binoculaire



Précision taxonomique

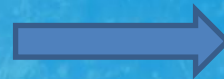
ex. de MARECHIARA

Identification

Comptage

Mesure manuelle de la taille

...



Coût énorme en temps de travail

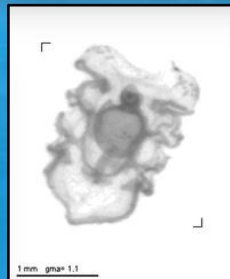
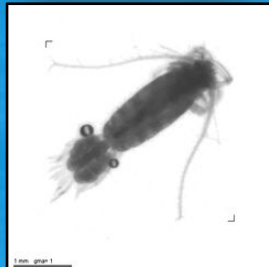
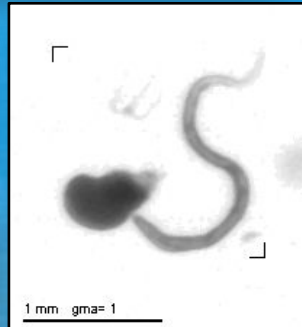
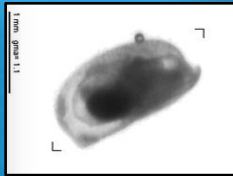
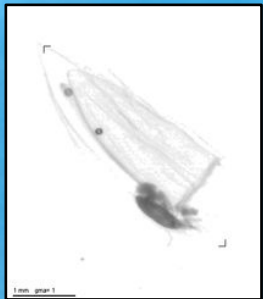
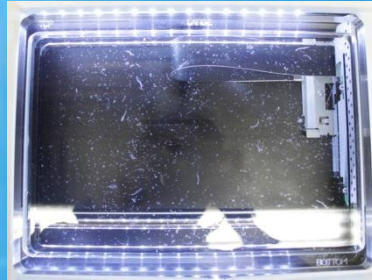
Besoin d'expertise (rare)

...

Peut-on faire mieux?

Imagerie planctonique

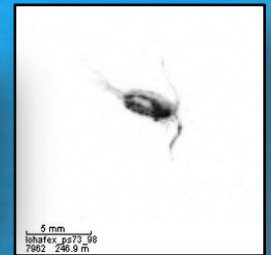
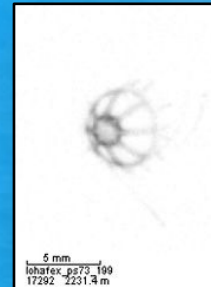
Filet + ZooScan



Prof. Vidéo Marin (PVM / UVP 5)



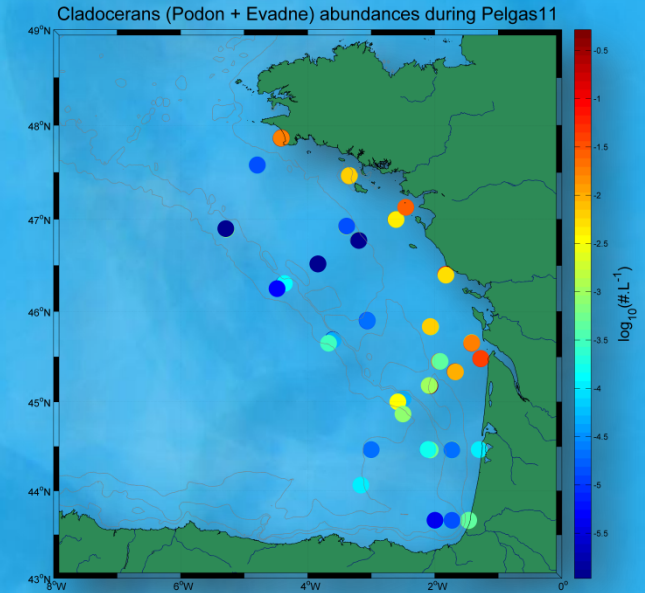
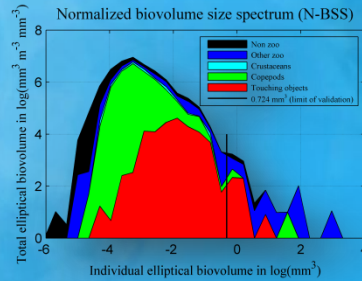
LOHAFEX



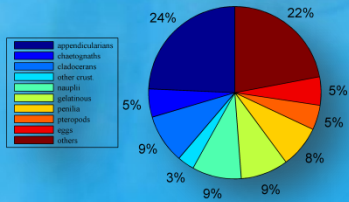
Imagerie planctonique qu'y a-t-il à analyser?

POINT B Zooplankton time series
Analyzed with the ZOOSCAN v. 2003
monthly means of **Aug 2003**

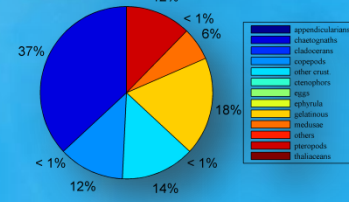
WP2 (200µm/0.25m²) vertical tows from 60m depth to surface
15 m³ per samples
Number of cumulated samples : 2
Stratified sampling : No
Total zooplankton : 1579 # m⁻³ ; 167 mm³ m⁻³
Total zooplankton : slope = -1.172 ; r² = 0.898
Copepods : 1269 # m⁻³ ; 87 mm³ m⁻³
Copepods : slope = -1.53 ; r² = 0.863



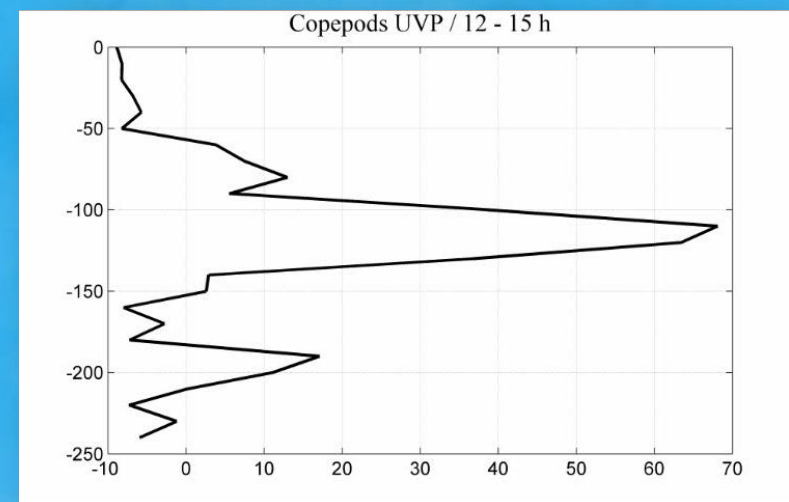
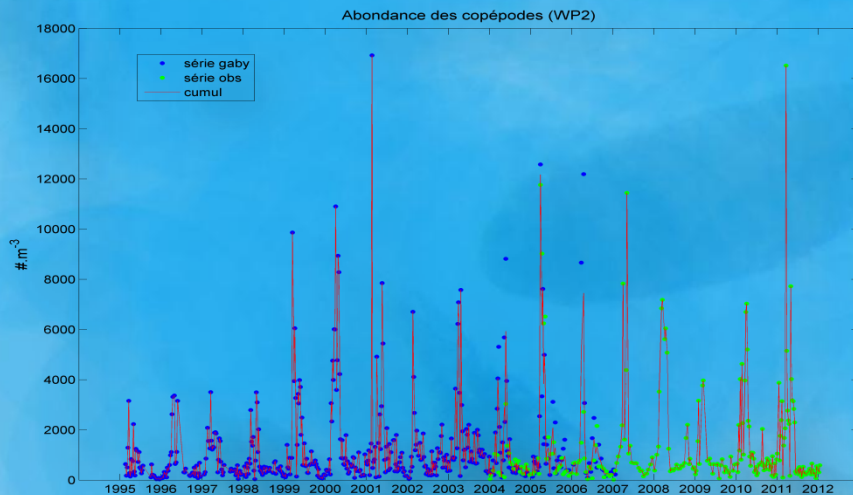
Predicted abundance of zoo taxa in # m⁻³
excluding copepods (80.37%)



Validated abundance of zoo taxa in # m⁻³
only individuals >0.724 mm³ (1.1%)



<http://www.obs-vlfr.fr/Rade/RadeZoo>



Imagerie planctonique

- Gain de temps (1-2h par échantillon)
- Formation rapide (2-3j pour reconnaître les groupes faunistiques)
- pré-tri automatique (entre 15 et 40% d'erreurs)
- Mesure de la taille (information des plus importantes)
- Mesures *in situ* (pas de floculation, cassage des individus fragiles, désagrégation. Mais toujours échappement)
- Visibilité du zooplancton
- **Mais, perte de l'information et de l'expertise taxonomique**

Futur de l'échantillonnage du zooplancton

Imagerie 2D: harder, better, faster, stronger...

Imagerie 3D: Boistel et al. 2011

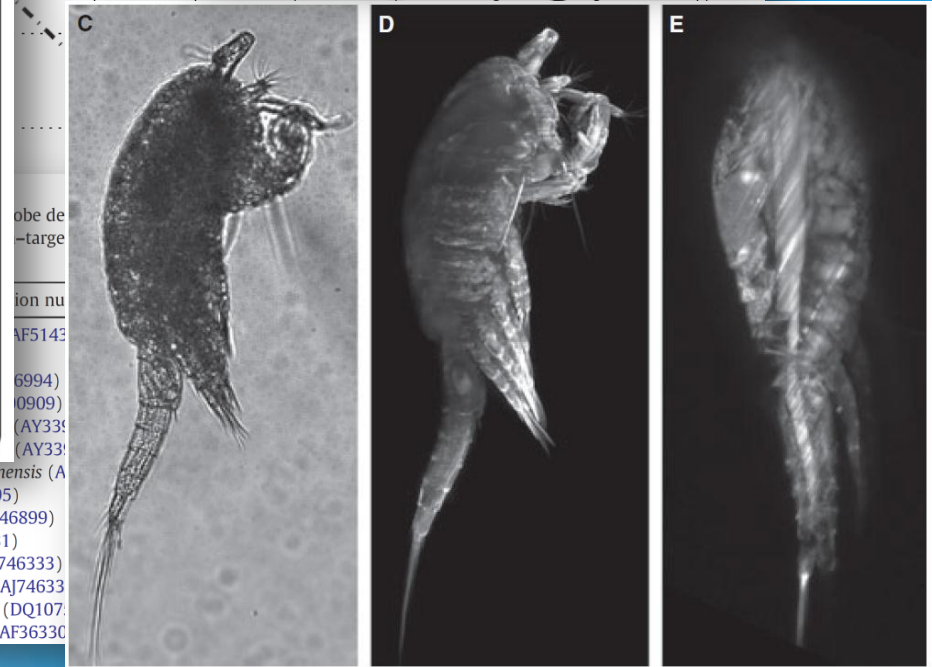
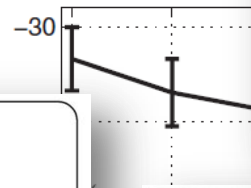
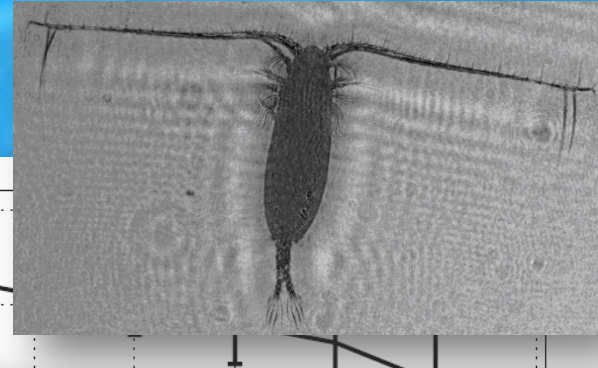
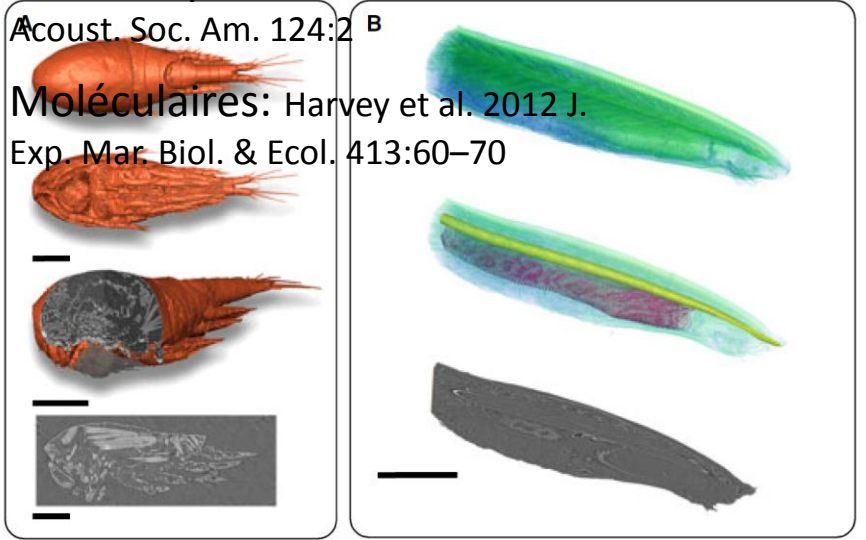
Marine Ecology 32:438–452

Acoustique: Roberts & Jaffe 2008 J.

Acoust. Soc. Am. 124:2 B

Moléculaires: Harvey et al. 2012 J.

Exp. Mar. Biol. & Ecol. 413:60–70



	...	...	...	.A.	...	.-.	<i>Skistodiaptomus oregonensis</i> (A
	...	...	...	.A.	.C-	.TC	<i>Tortanus</i> sp. (AY626995)
	...	...	...	.A.	.A-	.TC	<i>Candacia armata</i> (AY446899)
	...	...	...	.A.	C...	G-G	<i>Acartia tonsa</i> (FJ422281)
Cyclopoida	...	...	...	...	...	GT.	<i>Eucyclops speratus</i> (AJ746333)
	...	...	...	...	...	GTC	<i>Macrocyclops albidus</i> (AJ74633)
	...	...	...	G.	...	.TG	<i>Lamproglena chinensis</i> (DQ107)
Harpacticoida	...	...	...	.G.	...	GT.	<i>Tigriopus californicus</i> (AF36330)



Ex. de la Mer Ligure

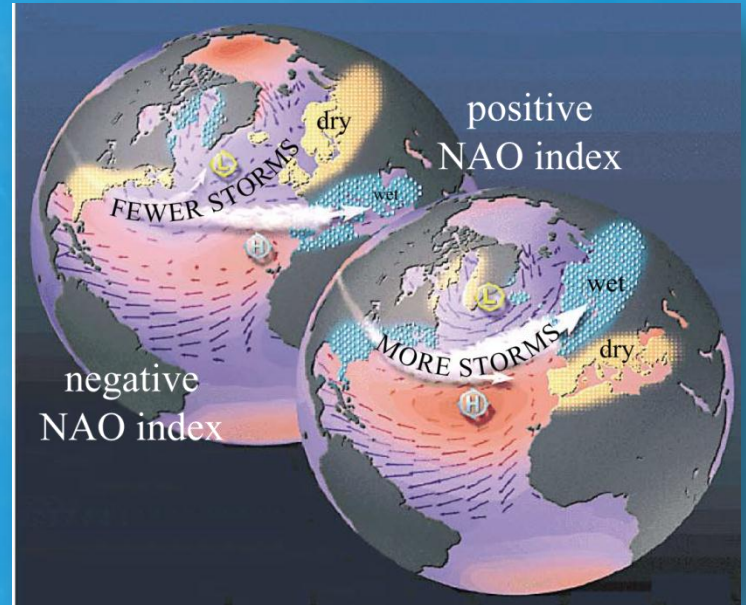
III. INFLUENCE DU CLIMAT

Le zooplancton et le climat

- **Sentinelle** (cf: Mackas & Beaugrand 2010 . J. Mar. Syst. 79:286–304):
 - Rôle pivot
 - Cycle de vie rapide (réponse plus immédiate)
 - Pas d'exploitation commerciale
- **Séries temporelles: données indispensables**
 - Observation de changements (graduels) ou abrupts
 - Composition et dominance des espèces
 - Biogéographie
 - Phénologie
 - État trophique...
 - Très souvent corrélés à des changements climatiques: utilisation d'indicateurs
 - NAO, AO, AMO, Enso, PDO, EMT...
 - On parle de « regime shift »

Le zooplancton et le climat

- Indicateur climatique, ex. du NAO



OPEN ACCESS Freely available online

PLoS one

The Mediterranean Sea Regime Shift at the End of the 1980s, and Intriguing Parallelisms with Other European Basins

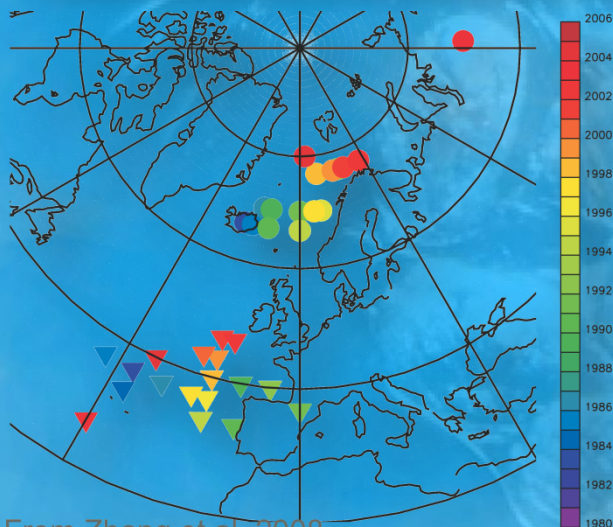
Alessandra Conversi^{1,2*}, Serena Fonda Umani³, Tiziana Peluso¹, Juan Carlos Molinero⁴, Alberto Santojanni⁵, Martin Edwards^{2,6}

1 Marine Sciences Institute (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), La Spezia, Italy, 2 Marine Institute, University of Plymouth, Plymouth, United Kingdom, 3 Department of Life Sciences, University of Trieste, Trieste, Italy, 4 Leibniz Institute of Marine Sciences, Kiel, Germany, 5 Marine Sciences Institute (ISMAR), Italian National Research Council (CNR), Ancona, Italy, 6 Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science (SAHFOS), Plymouth, United Kingdom

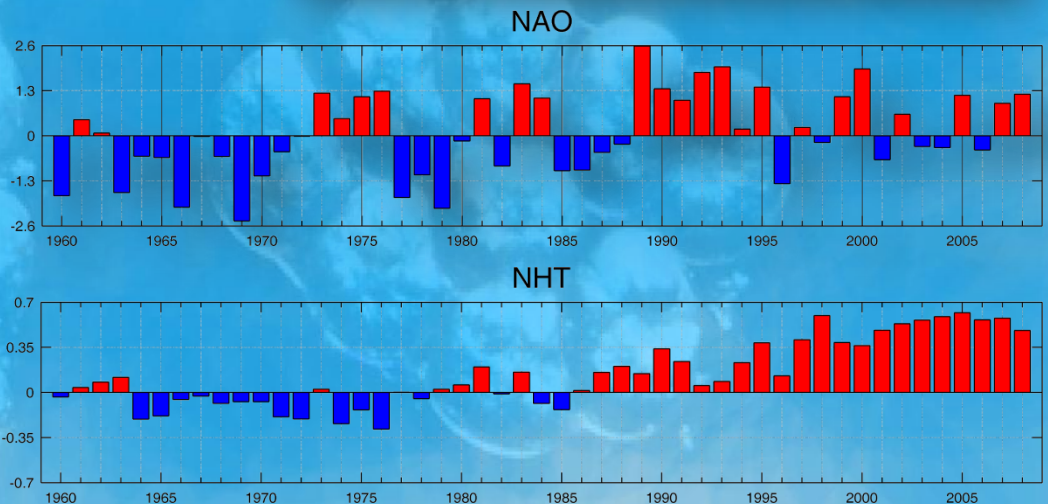
Abstract

Background: Regime shifts are abrupt changes encompassing a multitude of physical properties and ecosystem variables, which lead to new regime conditions. Recent investigations focus on the changes in ecosystem diversity and functioning associated to such shifts. Of particular interest, because of the implication on climate drivers, are shifts that occur synchronously in separated basins.

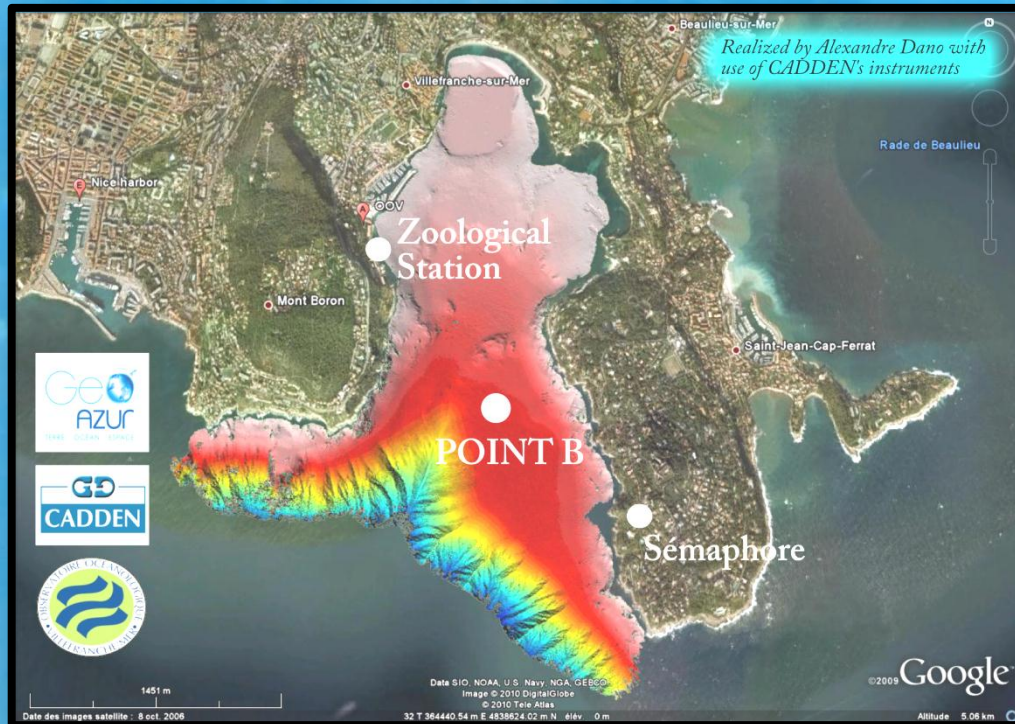
Principal Findings: In this work we analyze and review long-term records of Mediterranean ecological and hydro-climate variables and find that all point to a synchronous change in the late 1980s. A quantitative synthesis of the literature (including observed oceanic data, models and satellite analyses) shows that these years mark a major change in



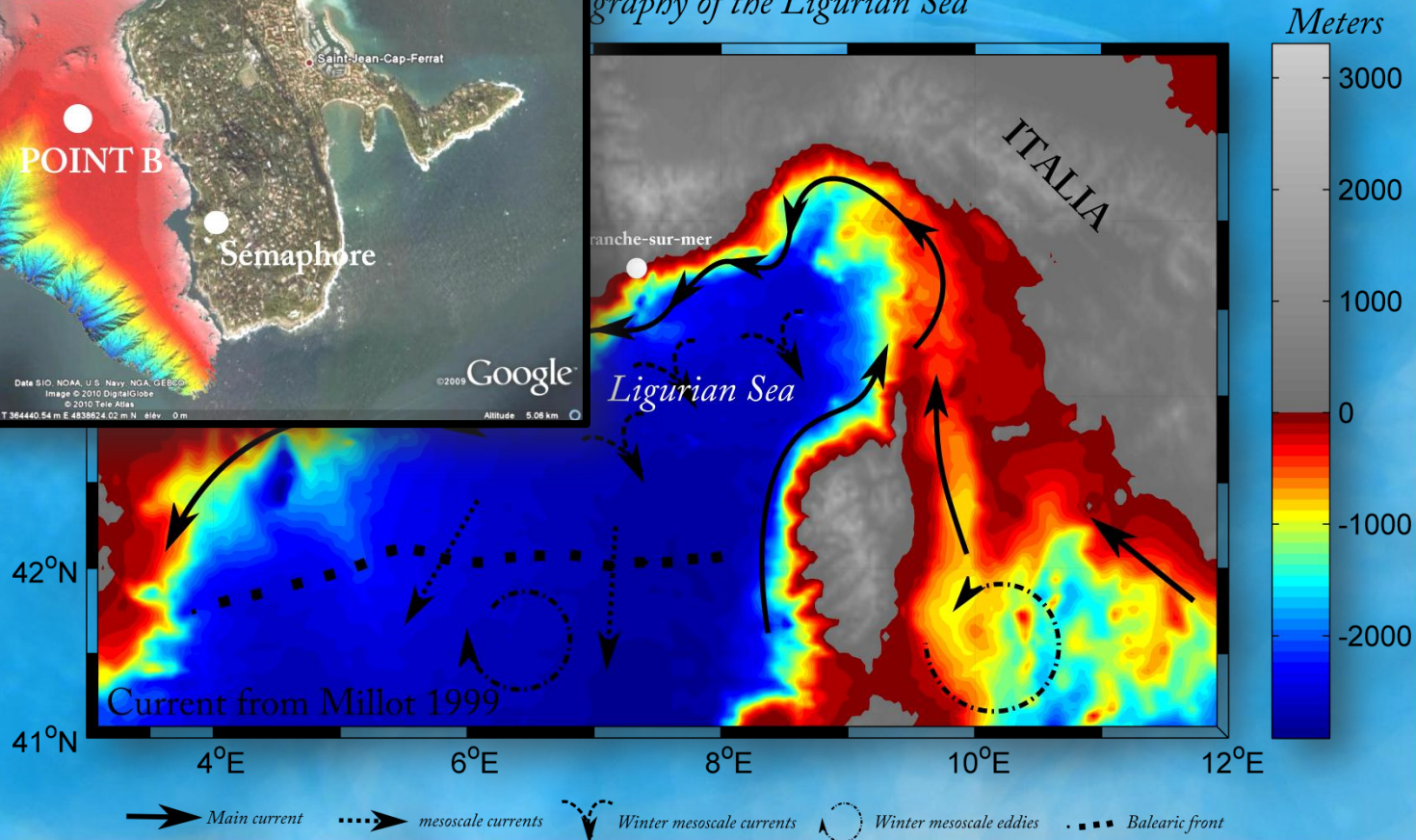
From Zhang et al. 2008



Exemple de la Mer Ligure (rade de Villefranche-sur-mer)



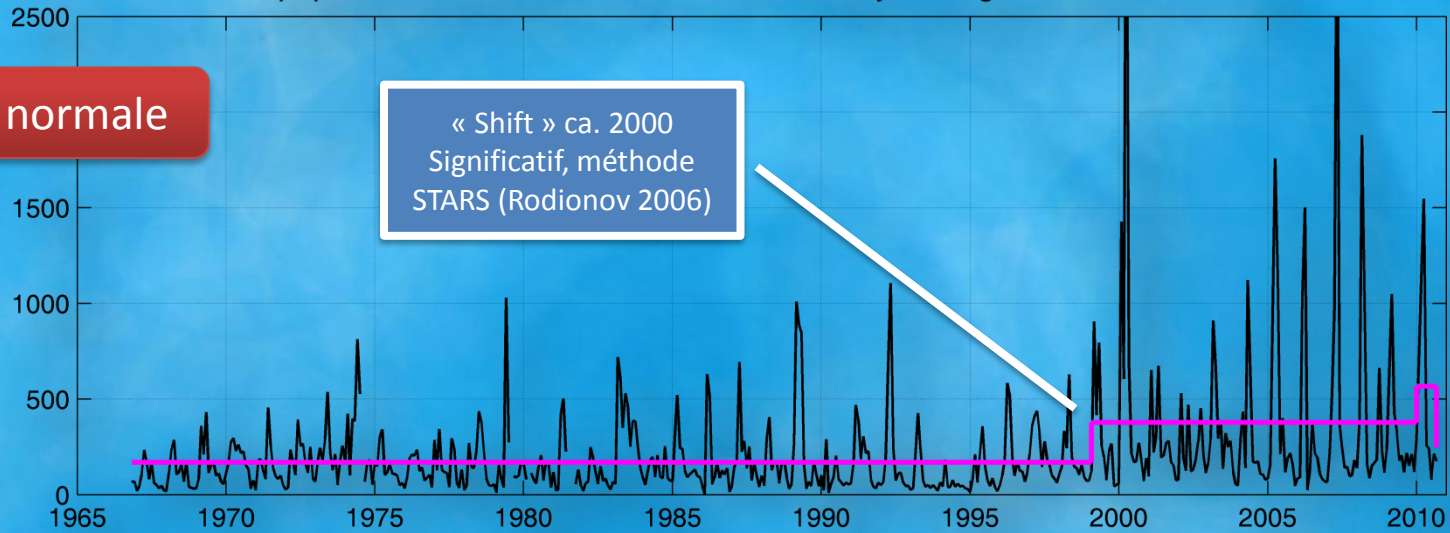
ography of the Ligurian Sea



Evolution décennale du zooplancton

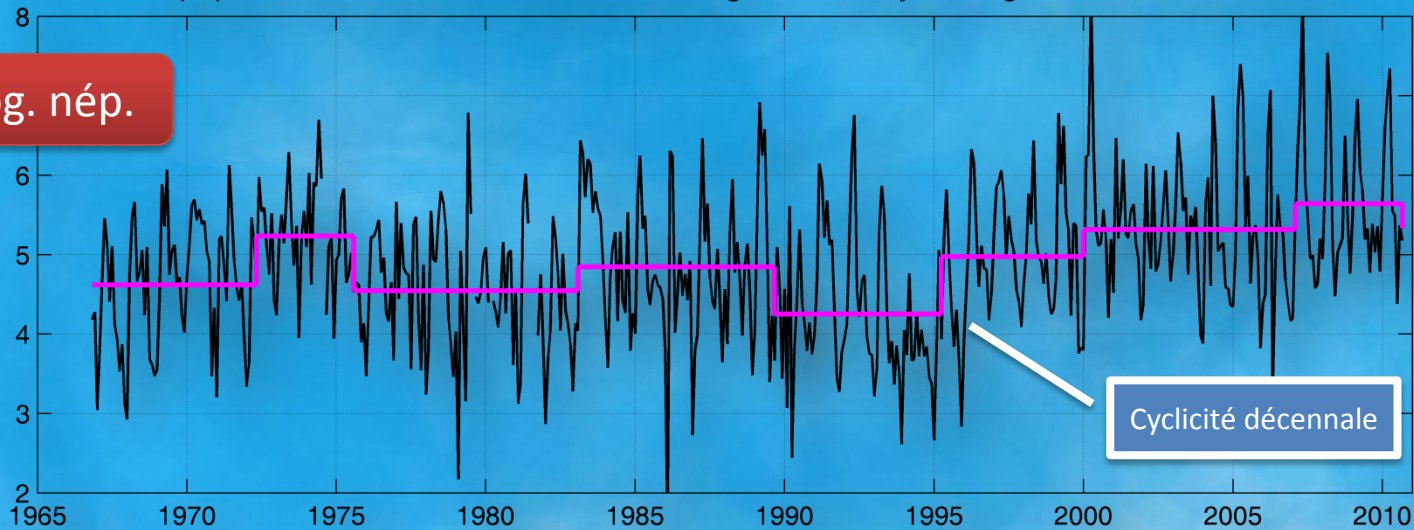
Copepods abundances $>0.0525 \text{ mm}^3$ / monthly average of the 4 time series

Echelle normale



Copepods abundances $>0.0525 \text{ mm}^3$ in $\log+1$ / monthly average of the 4 time series

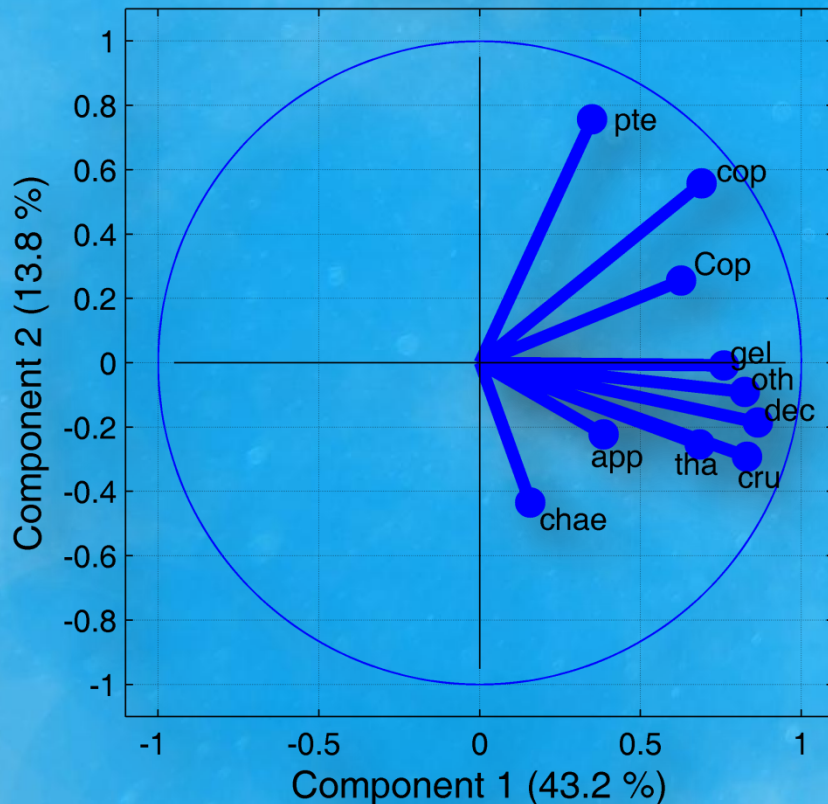
Echelle log. nép.



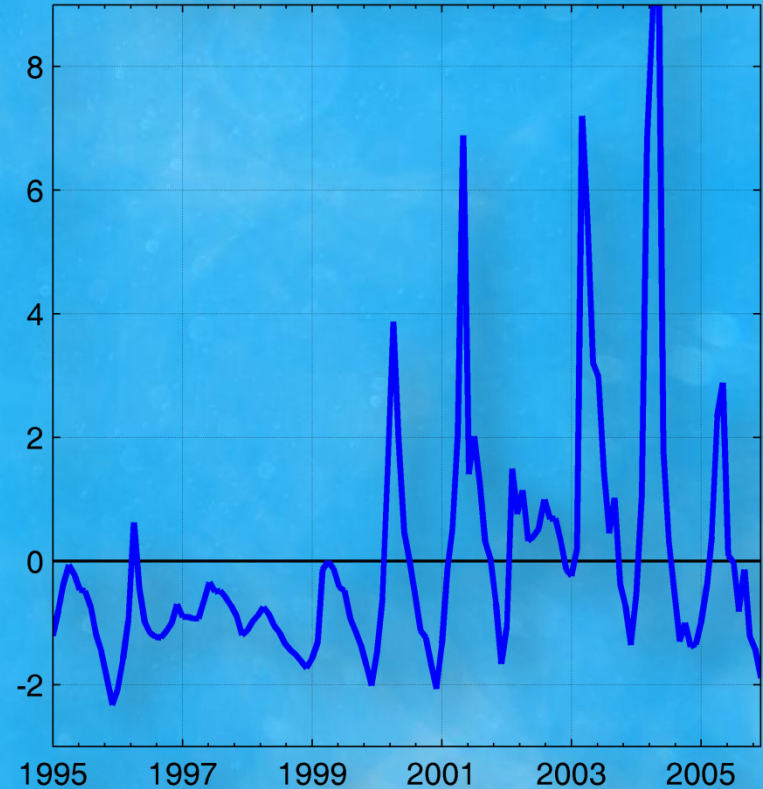
Evolution décennale du zooplancton

- Zoom sur 1995 – 2006
- Synchronie: forçage important
- Rôle du climat hivernal et estival !

Descriptors space



Component 1 (43.2 %) time series



Forçage hivernal

NAO+

Froid et sec:
Moins d'eau fraîche
Plus d'évaporation



Eau de surface plus froide et salée:
Plus dense

Entrée de
nutriments

Convection:
Mélange
Moins de
stratification

NAO-

Doux et humide:
Plus d'eau fraîche
Moins d'évaporation



Eau de surface plus chaude et douce:
Moins dense

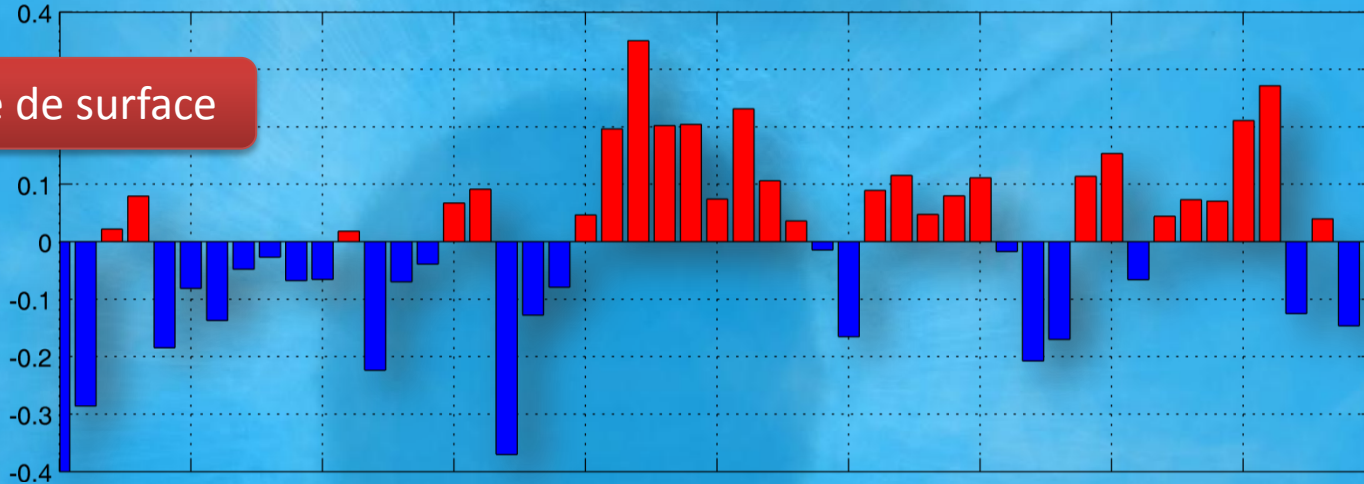
Entrée de
nutriments

Convection:
Mélange
Plus de
stratification

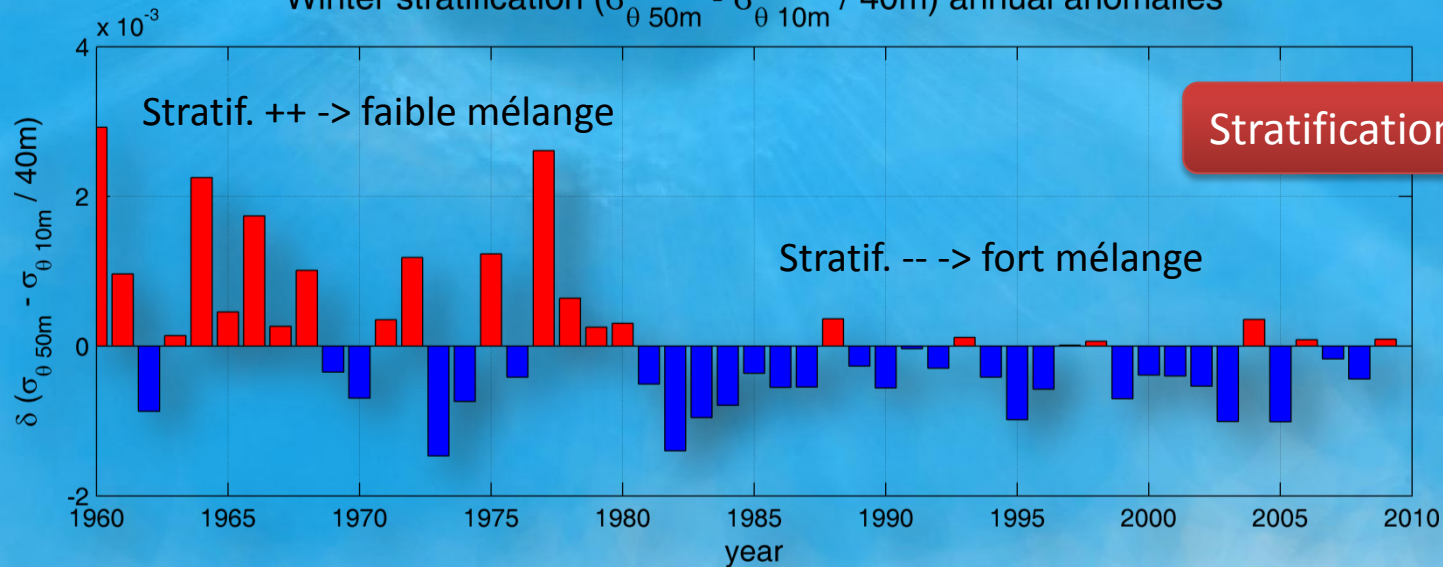


Forçage hivernal

Winter density annual anomalies



Winter stratification ($\sigma_{\theta 50m} - \sigma_{\theta 10m} / 40m$) annual anomalies



Forçage hivernal

North Atlantic Oscillation

Précipitations

Température de l'air

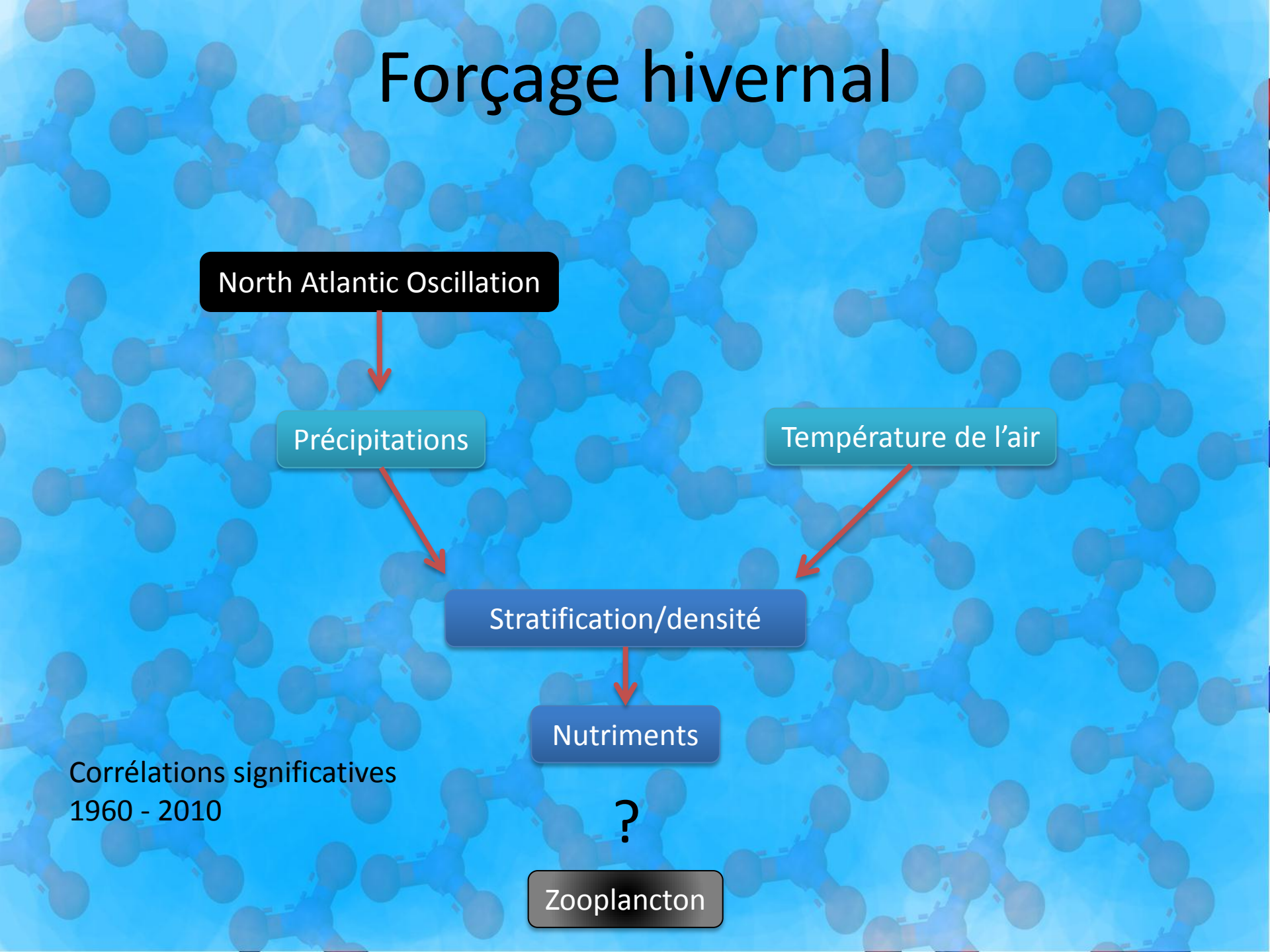
Stratification/densité

Nutriments

?

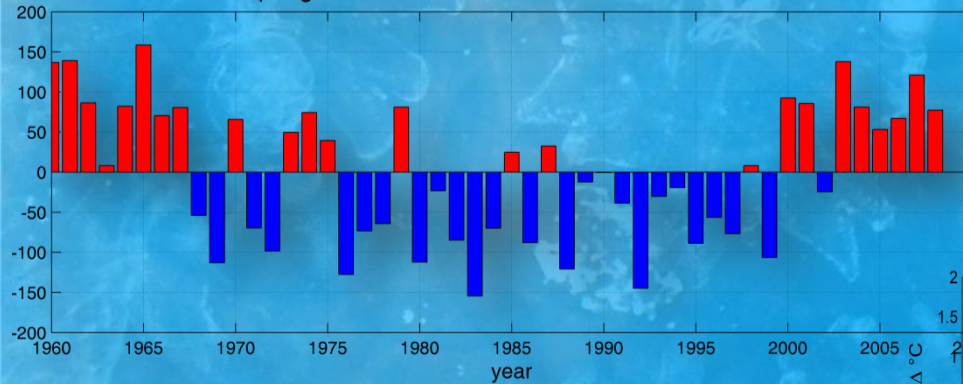
Zooplancton

Corrélations significatives
1960 - 2010



Forçage estival

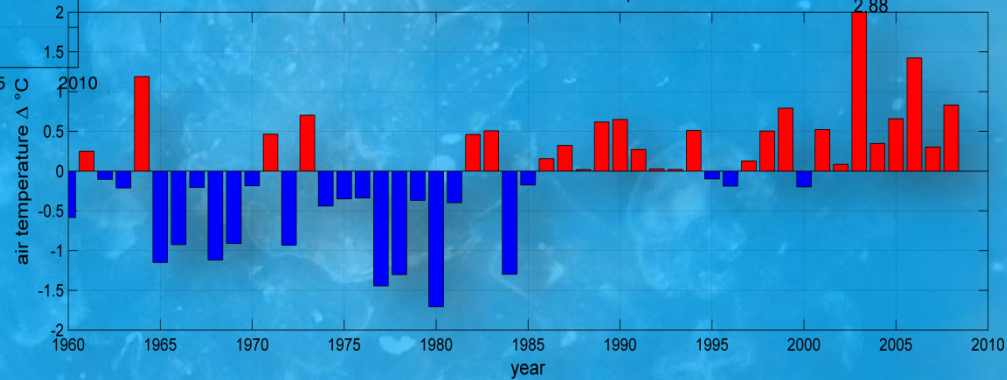
Spring/summer solar irradiation annual anomalies



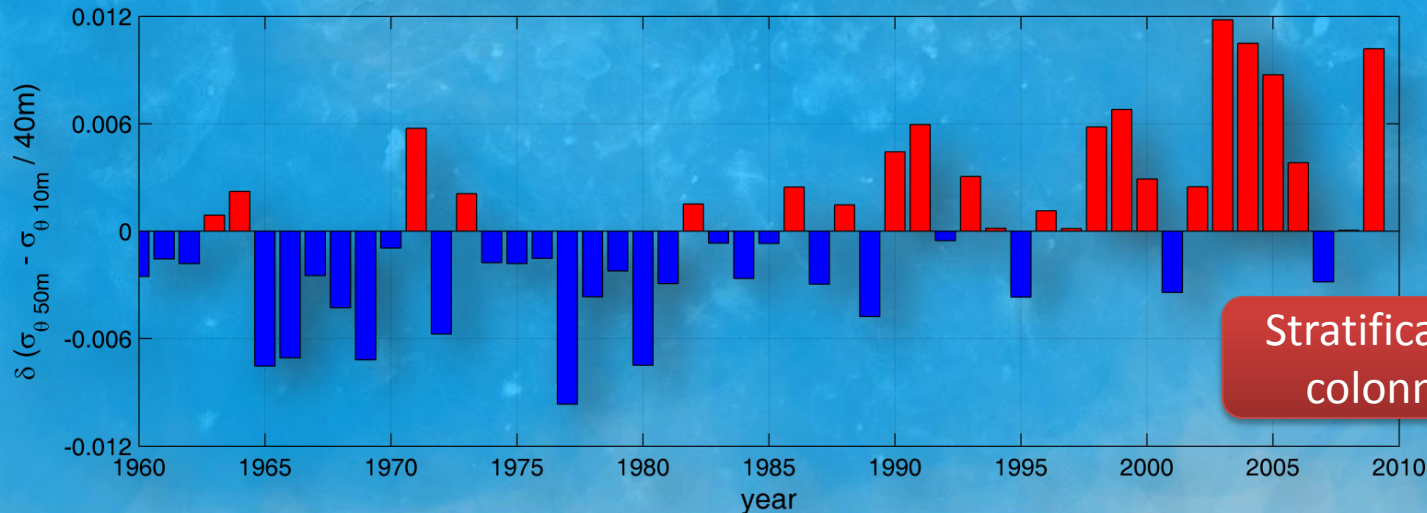
Irradiation Solaire estivale

Température de l'air
estival

Summer annual values of air temperature



Summer stratification ($\sigma_{\theta 50m} - \sigma_{\theta 10m} / 40m$) annual anomalies

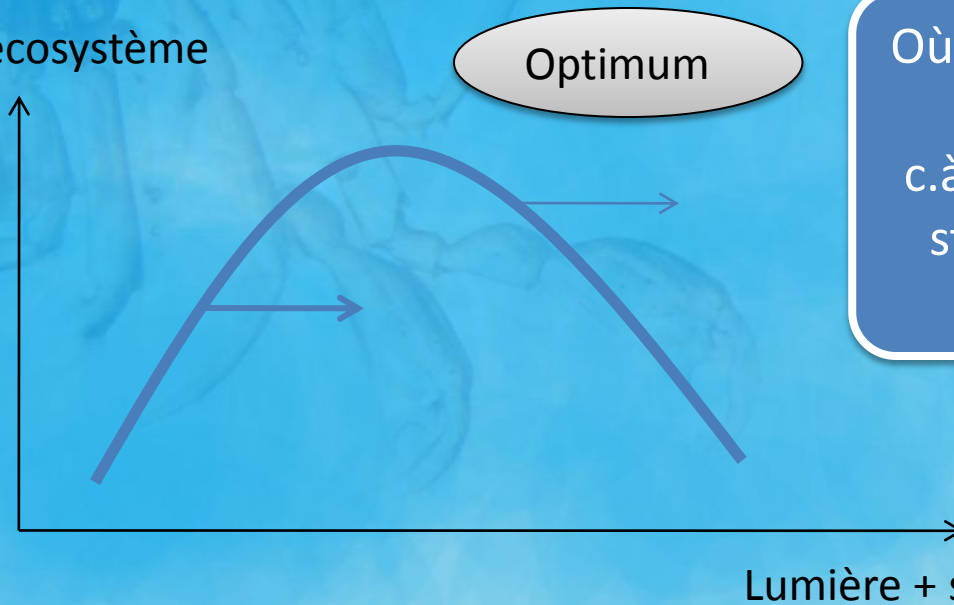


Stratification de la
colonne d'eau

Forçage estival

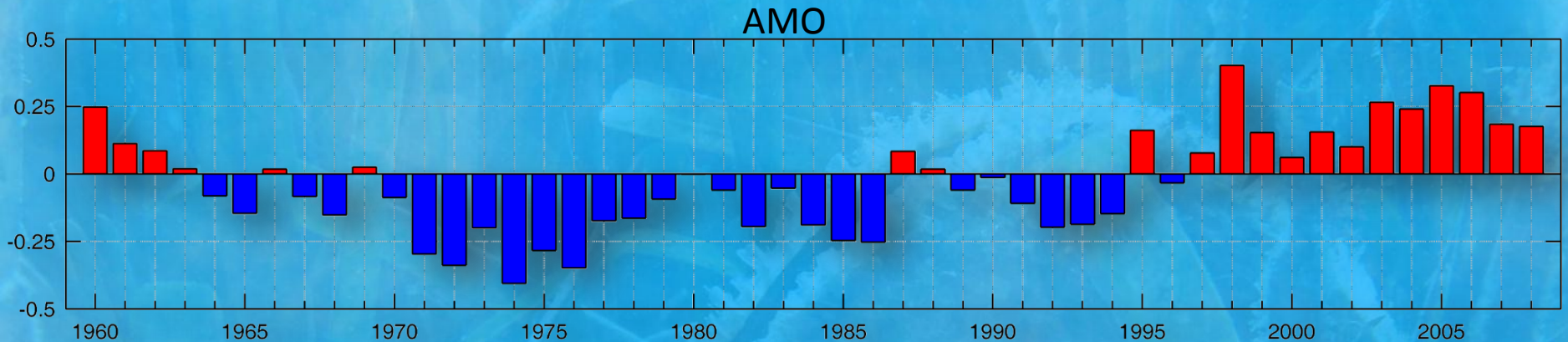
- Effet positif de l'irradiation solaire: diminution de la limitation par la lumière de la croissance du phytoplancton?
- Pas d'effet négatif de la stratification (contradiction avec ce qui est généralement admis):
 - Augmentation pas suffisante
 - Ou, stratification optimum (voir Asknes & Ohman 2009 Limnol. Oceanogr., 54 ; Rykaczewski & Dunne 2010 Geophys. Res. Lett., 37 ; Vandromme et al. 2011 Biogeosciences 8)

Réponse de l'écosystème



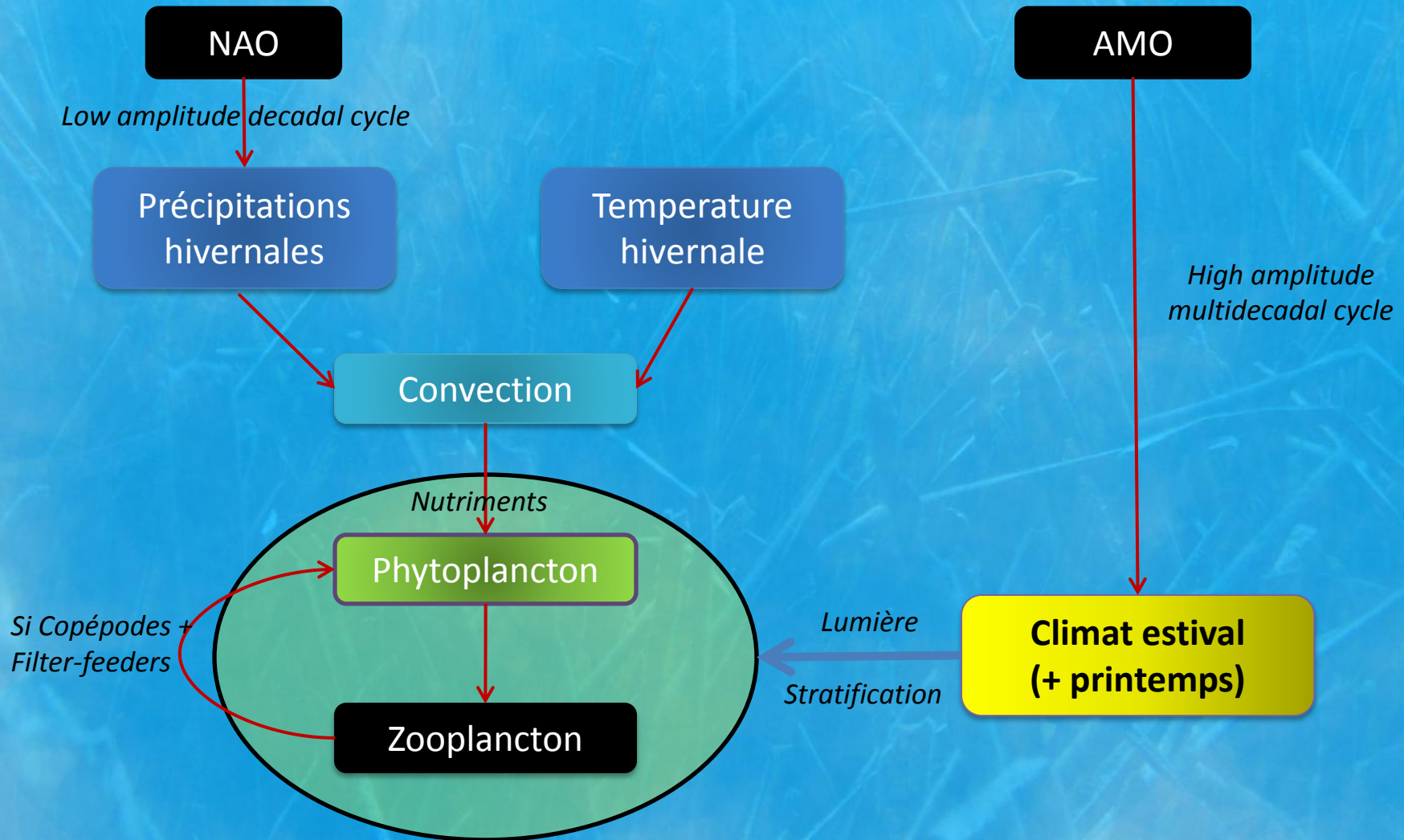
Où sommes-nous sur cette courbe?
c.à.d. à partir de quand la stratification deviendra délétère?

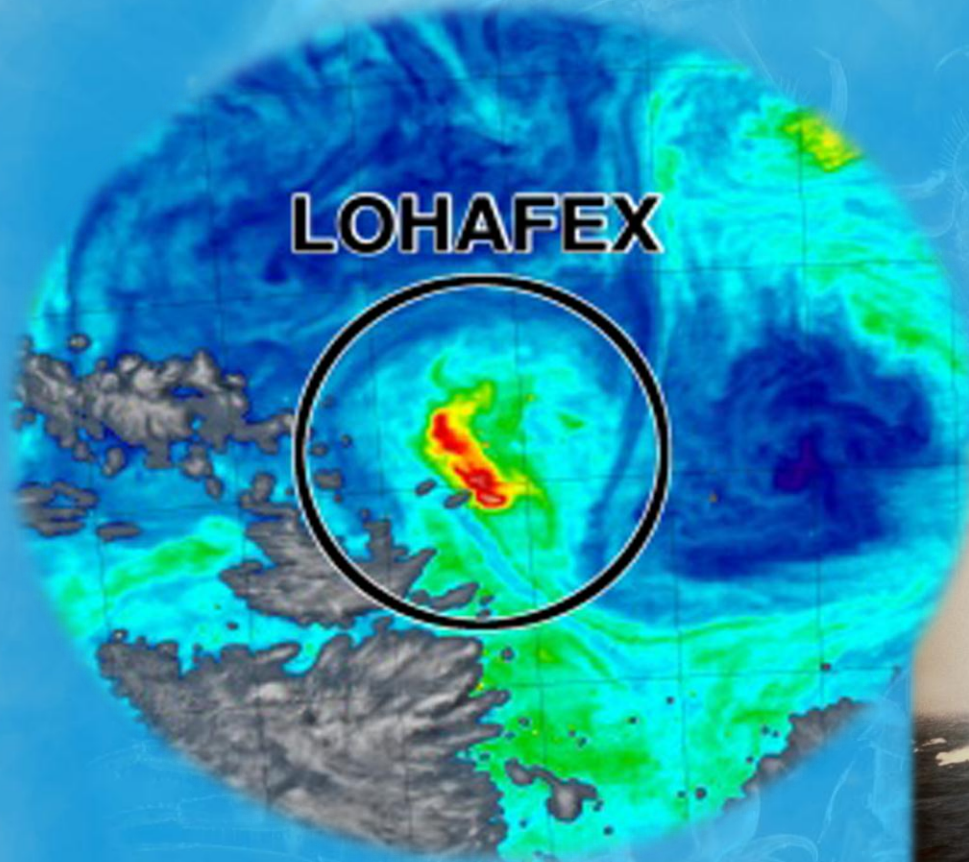
Forçage estival



- AMO, Atlantic Multidecadal Oscillation
 - Index basé sur la Temperature de surface de l'Océan Atlantique
 - Période de 60-70 ans (Prochaine période froide dans +/- 20 ans)
 - Composants naturels et anthropiques
- Significativement corrélé à l'irradiation, la stratification et le zooplancton
- Impact sur des écosystèmes pélagique?:
 - Sardines dans la Manche, pêcheries en Norvège, Anchoies de l'Atlantique Nord (études sur de longue série temporelle)
- Voir les travaux de Jürgen Alheit... (workshop WKAMO tenu à Woods-hole début juin 2011 sur l'AMO)

Schéma conceptuel

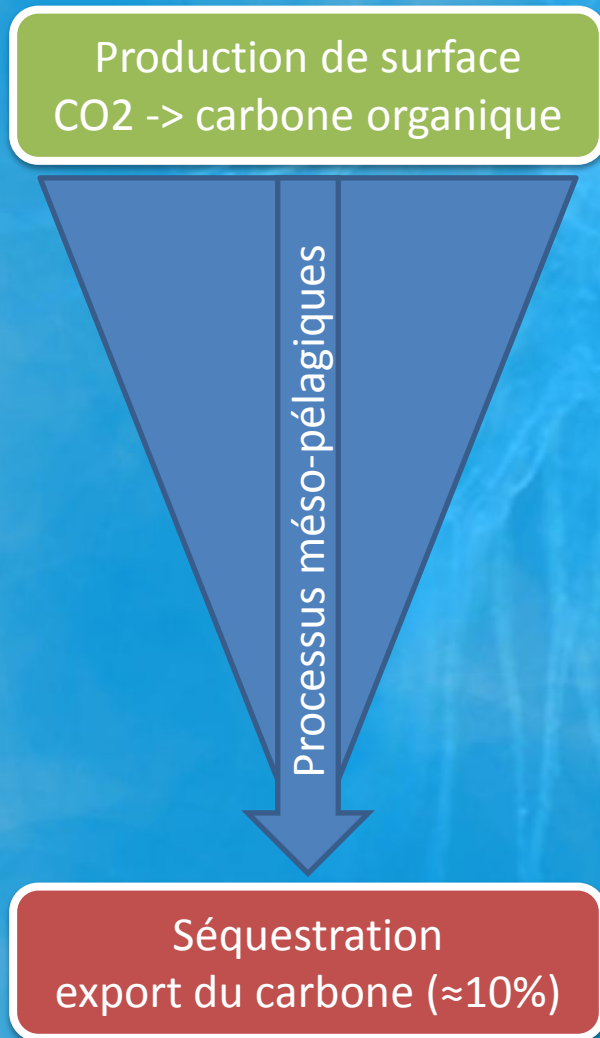




Ex. de la campagne de fertilisation en fer LOHAFEX

IV. RÔLE BIOGÉOCHIMIQUE

La pompe biologique à CO₂



Facteurs clefs

- Composition de la communauté phytoplanctonique
- Processus de reminéralisation
- Nutriments et oligominéraux (fer par exemple)

Impact du Zooplancton

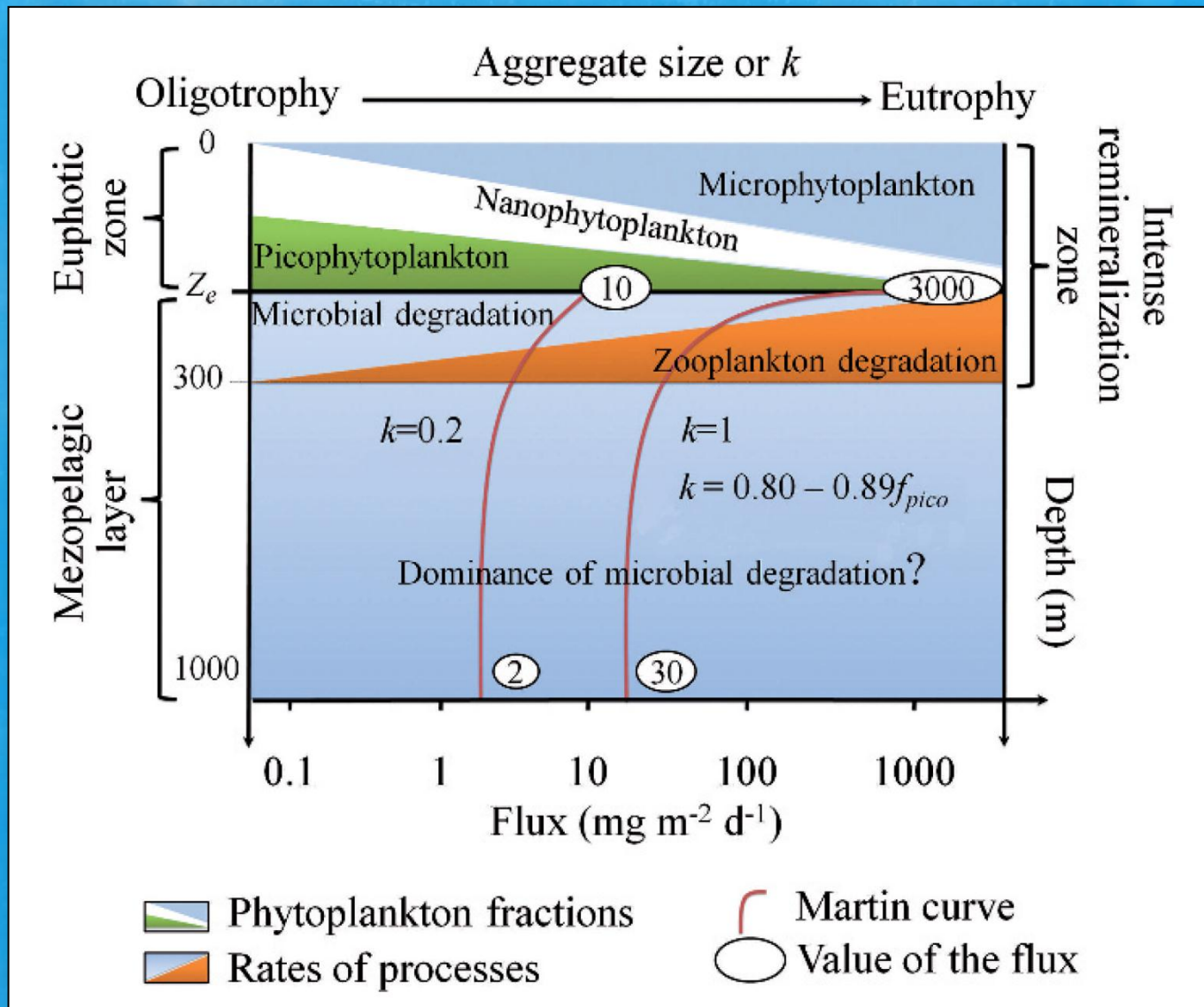
positif

- Fèces denses (ex. appendiculaires, salpes...)
- Proies pour prédateurs supérieurs (Fèces dense et large)
- Tuniciers Filtreurs
- Autres détritux (loge, corps...)

négatif

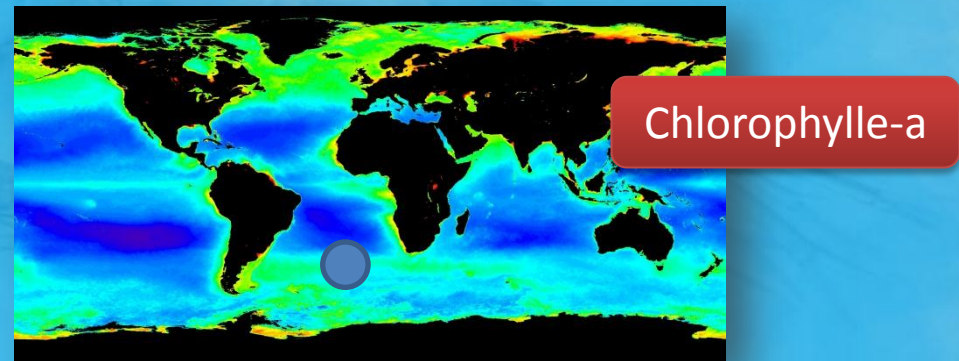
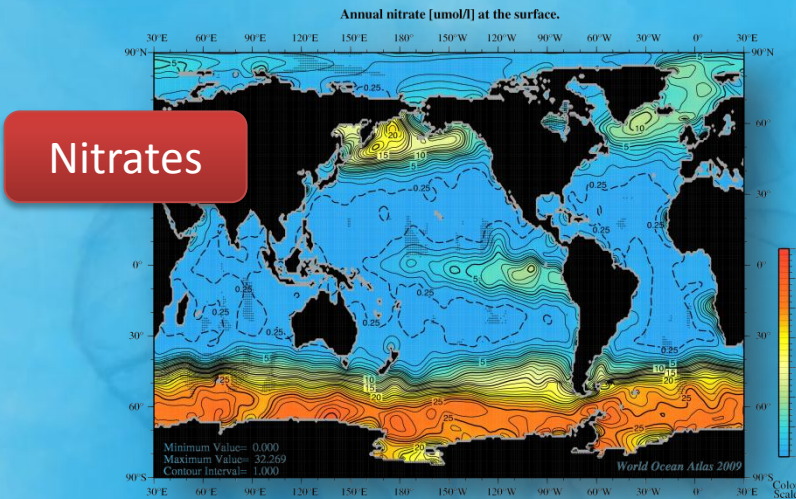
- Fèces peu denses (microzooplancton)
- Coprophagie
- Coprohéxie
- Fragmentation
- Production de DOM (méduse par exemple)

La pompe biologique à CO₂



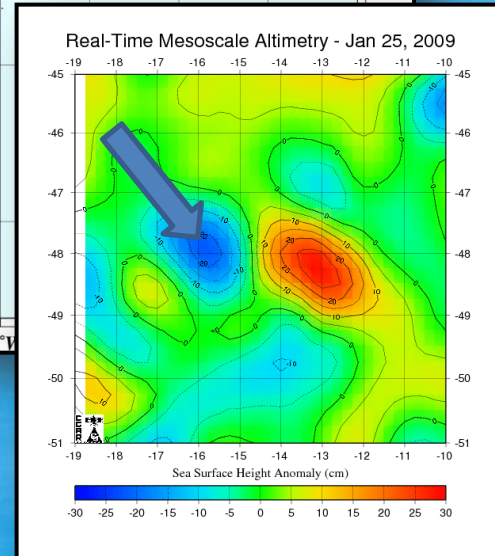
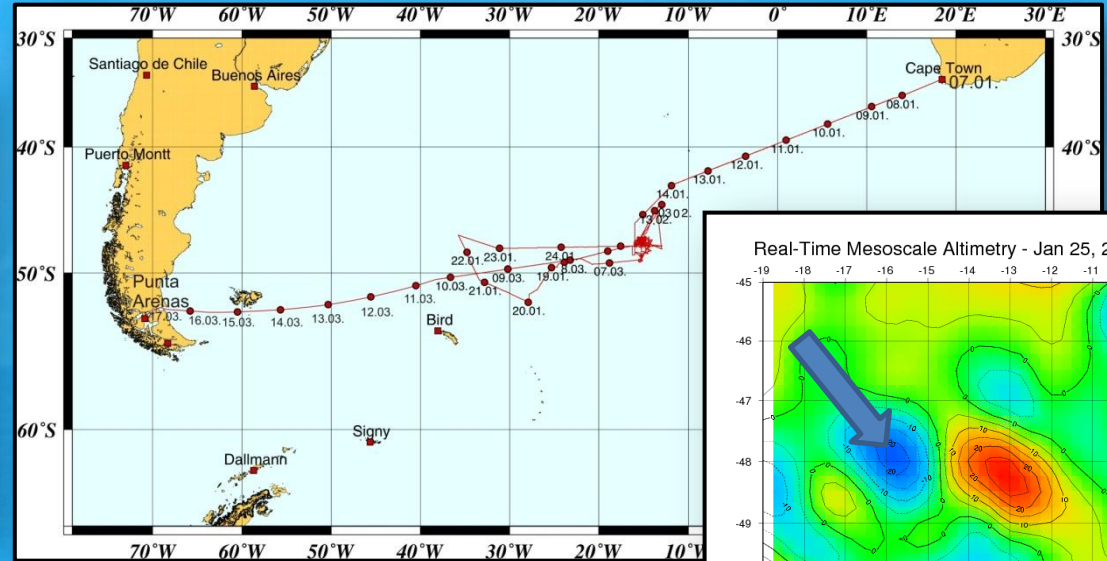
Fertilisation en fer

- LOHAFEX (loha -> fer en hindou), expérience de fertilisation en fer (la 12^{ème} à avoir eu lieu), pourquoi?



- Zone HNLC (High Nut. Low Chl.)
 - 20% des océans
 - Hypothèse de Martin -> faible production due à l'absence de fer
- Fer : origine terrestre (poussière, fleuves, fonte des icebergs...)
- Fer -> déblocage de la production primaire -> augmentation du flux -> séquestration de carbone

L'expérience LOHAFEX



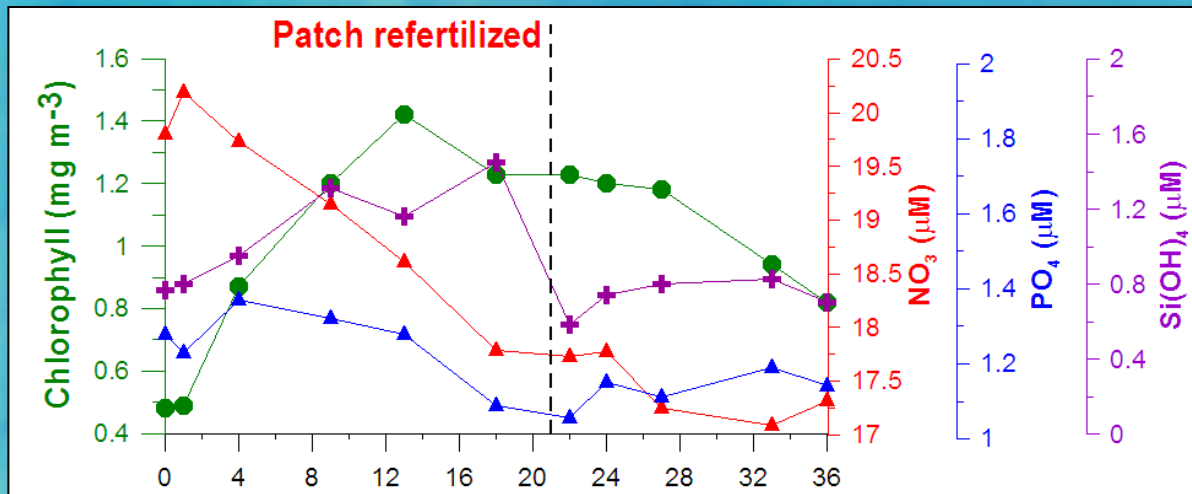
Du 7 Janvier au 17 Mars 2009

- Fertilisation de 300km²
- 20 tonnes de sulfate de fer
- 38 jours à suivre le patch



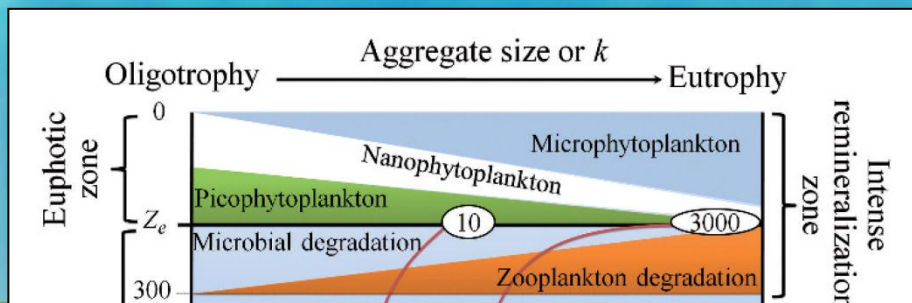
Réponse de l'écosystème

Nutriments et Chlorophyll-a



NO₃ ++ mais Si(OH)₄ --
 Chl-a de 0.5 à 1.4 mg.m-3
 puis diminution

Sans silice: communauté phytoplanctonique dominée par les nanoflagellés (*Phaeocystis atlantica* par exemple)
Pas d'augmentation des diatomées



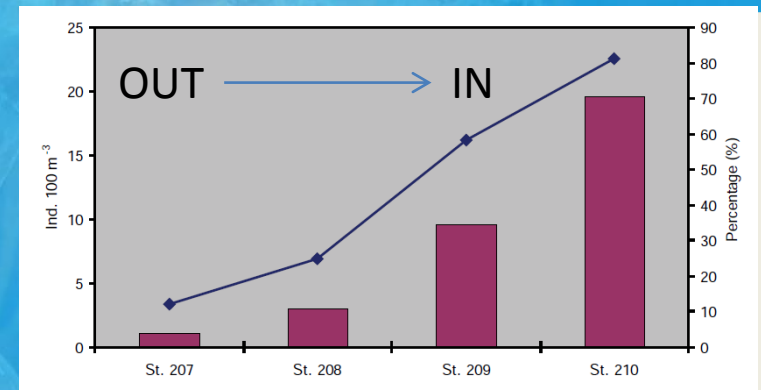
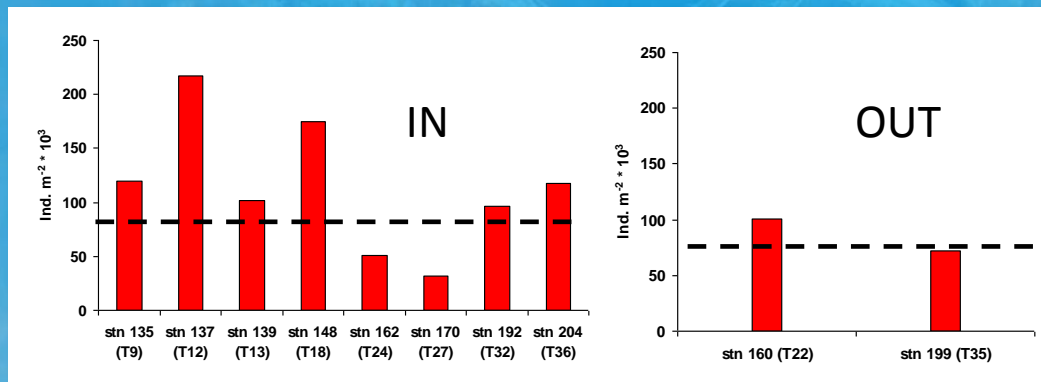
Dégradation dominé par la boucle microbienne?

Réponse de l'écosystème

GLOBEC INTERNATIONAL NEWSLETTER OCTOBER 2009

A non-diatom plankton bloom controlled by copepod grazing and amphipod predation: Preliminary results from the LOHAFEX iron-fertilisation experiment

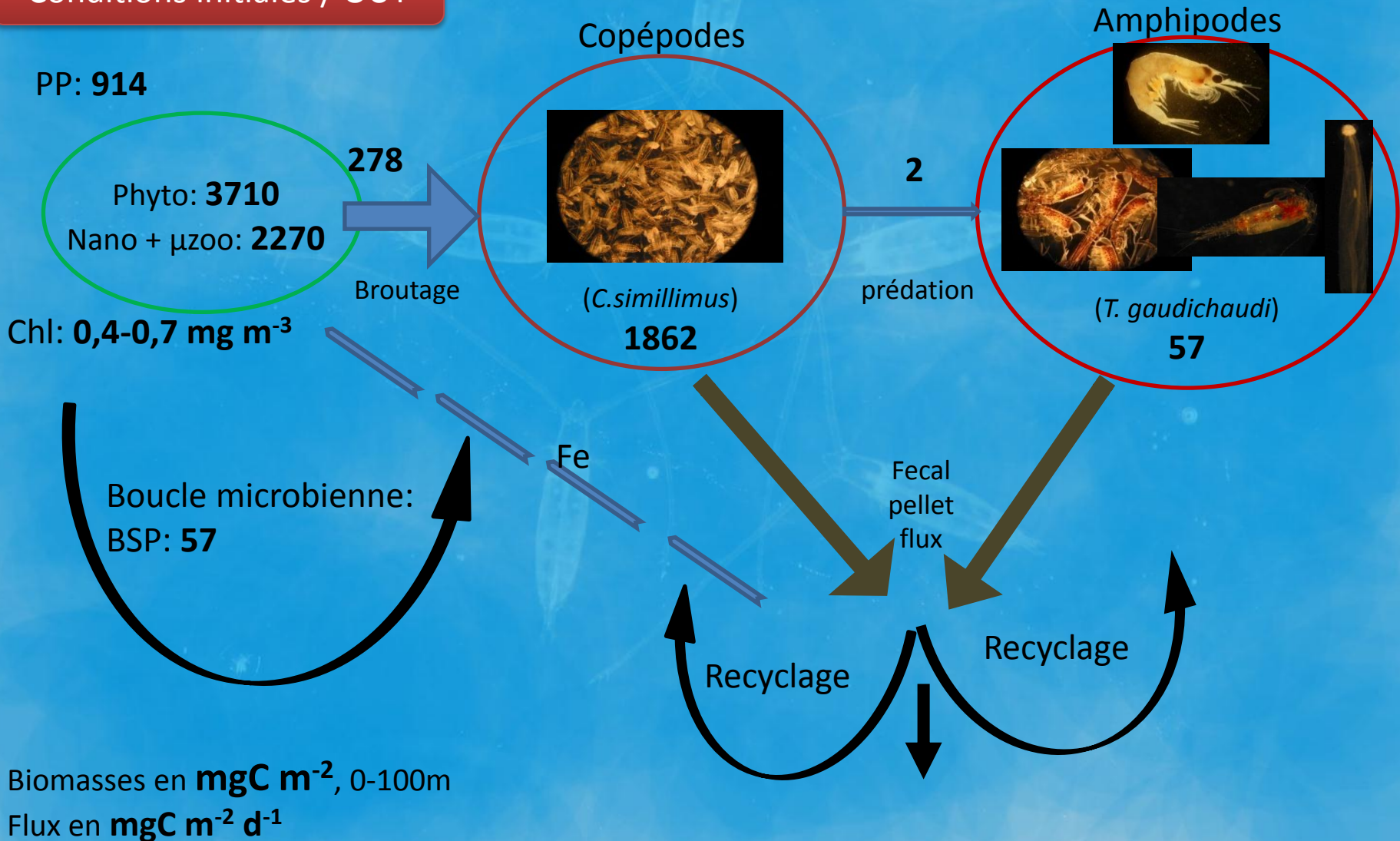
Maria Grazia Mazzocchi¹, Humberto E. González², Pieter Vandromme³, Inès Borrione⁴, Maurizio Ribera d'Alcalà¹, Mangesh Gauns⁵, Philipp Assmy^{4,6}, Bernhard Fuchs⁷, Christine Klaas⁴, Patrick Martin⁸, Marina Montresor¹, Nagappa Ramaiah⁵, Wajih Naqvi⁵, Victor Smetacek⁴



Dégradation dominé par le zooplancton (méso et macro) et non par la boucle microbienne

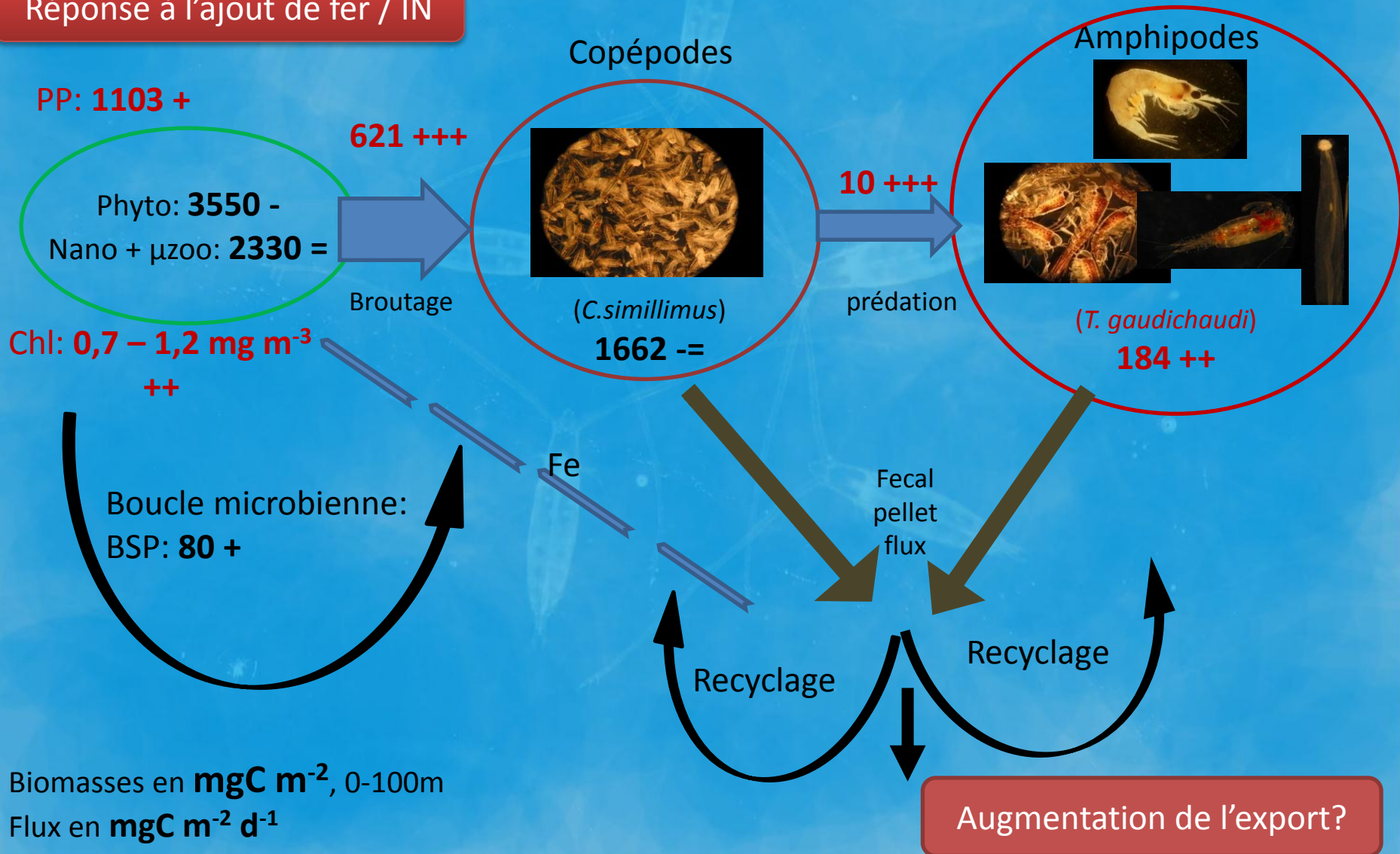
Réponse de l'écosystème

Conditions initiales / OUT



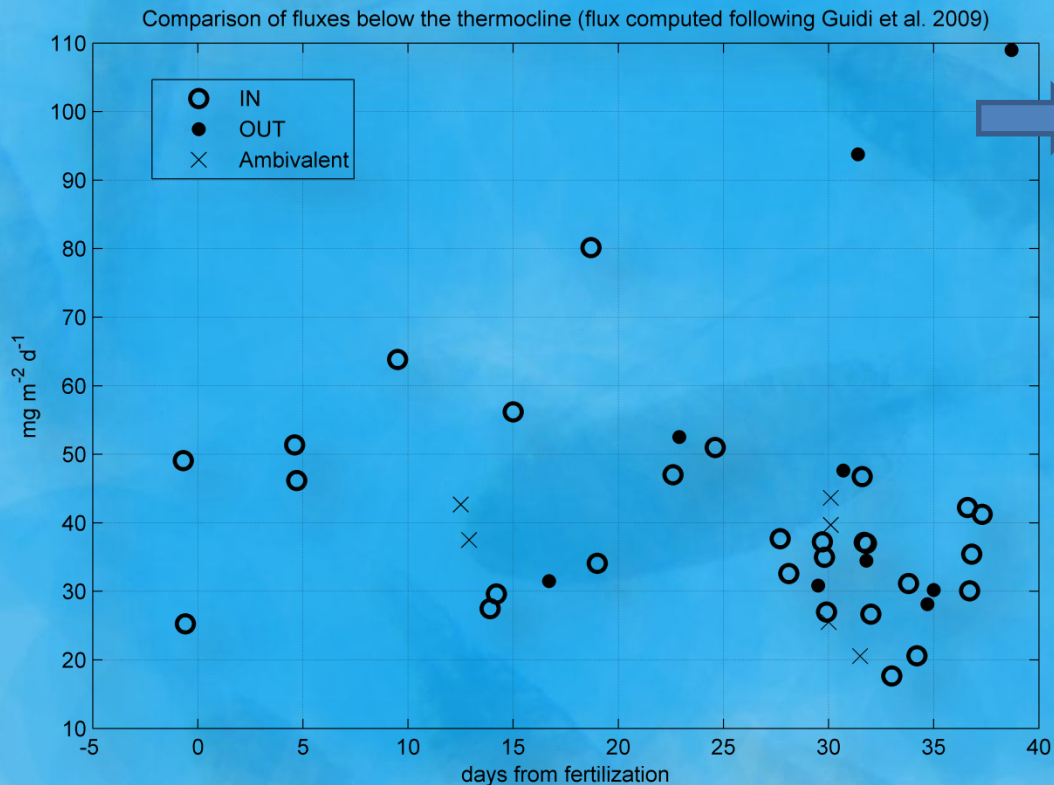
Réponse de l'écosystème

Réponse à l'ajout de fer / IN



Evolution de l'export de carbone

- Papier soumis: Martin et al. « Downward particle export during the LohaFEX artificial iron fertilization experiment »
- Mesure des flux: Thorium 234, trappe à sédiment PELAGRA, O₂:Ar et UVP5



Flux estimé par le spectre de taille des particules mesuré par le UVP

- Représentatif des autres données
- Possible augmentation entre les jours 10 et 20
- Mais globalement pas de tendance ou de différence (IN/OUT) significative

Pas d'augmentation du flux

Résultats principaux

- Pas d'augmentation de l'export
 - Absence de diatomées
 - Impact négatif du zooplancton (coprohexy)
 - Smetacek 1985 Marine Biology 84:239-251
- Augmentation rapide des flux trophiques
 - « paradoxe du krill »
 - Cycle d'autocatalyse

$$R_p^*(x) = \alpha \cdot \int_{\mathbb{R} \setminus [x_0, x_1]} e^y \cdot p_z(x, y) \cdot e^{\beta y} \cdot dy = \frac{\alpha_r(\alpha, \beta)}{2} \cdot \left[2 + \operatorname{erf}(\bar{v}_1(x, \beta)) - \operatorname{erf}(\bar{v}_0(x, \beta)) \right] \cdot e^{(\beta+1)x} \quad \hat{v}_1(x) = \frac{x - x_1 + \rho + (\beta_d - \beta)\sigma}{\sigma\sqrt{2}}$$

$$\mu_{max} \cdot I_N \cdot I_I \cdot I_T \quad \mu_{ext}(x) = \alpha \cdot \int_{\mathbb{R} \setminus [x_0, x_1]} \frac{D(y) \cdot p_z(y, x)}{D(y)/A(y) + \alpha_r(\alpha, \beta) \cdot e^{(\beta+1)y}} \cdot e^{\beta y} \cdot dy = \frac{\alpha_m(\alpha, \beta)}{2} \cdot \left[2 + \operatorname{erf}(\hat{v}_1(x)) - \operatorname{erf}(\hat{v}_0(x)) \right] \cdot e^{(\beta_d-1)x}$$

$$\frac{\alpha_r(\alpha, \beta)}{\alpha_d + \alpha_r(\alpha, \beta)} < 1 \quad M_p(t) = \int_{x_0}^{x_1} D(x) \cdot \frac{R_p(x, t)}{D(x)/A(x) + R_z(x, t) + R_p(x, t)} \cdot u_z(x, t) \cdot dx \quad \mathcal{G}(x, t) = k_a \cdot k_c \cdot D(x) \cdot \frac{R_z(x, t) + R_p(x, t)}{D(x)/A(x) + R_z(x, t) + R_p(x, t)}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} \cdot dx \quad \lambda = 2\beta_D - 4 + \frac{2\rho}{\sigma^2} \quad \mathcal{M}(x, t) = \mu_{ext}(x, t) + \int_{x_0}^{x_1} \frac{D(y) \cdot p_z(y, x)}{D(y)/A(y) + R_z(y, t) + R_p(y, t)} \cdot u_z \cdot dy$$

$$-M_p^* = 0 \quad A(x) = \alpha_a e^{\beta_a x} \quad E_r(t) = k_a \cdot (1 - k_c) \int_{x_0}^{x_1} D(x) \cdot \frac{R_z(x, t) + R_p(x, t)}{D(x)/A(x) + R_z(x, t) + R_p(x, t)} \cdot u_z(x, t) \cdot dx$$

$$R_z(x) = \underbrace{\alpha \cdot \sigma \sqrt{2\pi} \cdot e^{\frac{(\beta+1)^2 \sigma^2}{2}} \cdot e^{-(\beta+1)\rho}}_{\alpha_r(\alpha, \beta)} \cdot e^{(\beta+1)x} \quad \beta_a = \beta_d - \beta - 1 \quad p_z(x, y) = e^{-\frac{(x-y-\rho)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\frac{1}{e^{(\beta_d+\beta)(x_1-x_0)} - 1} \cdot (\beta_d + \beta) \quad u_z(x) = \alpha e^{\beta x} \quad \frac{\partial u_z(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial e^{-x} \cdot \mathcal{G}(x, t) \cdot u_z(x, t)}{\partial x} - \mathcal{M}(x, t) \cdot u_z(x, t)$$

$$R_z(x, t) = \int_{x_0}^{x_1} e^y \cdot p_z(x, y) \cdot u_z(y, t) \cdot dy \quad u_z(x_0, t) = \frac{k_r \cdot E_r(t)}{\mathcal{G}(x_0, t)} \quad \frac{d u_p(t)}{dt} = e(t) \cdot u_p(t) - M_p(t) \quad \hat{v}_0(x) = \frac{x - x_0 + \rho + (\beta - \beta_d)\sigma}{\sigma\sqrt{2}}$$

$$\bar{v}_1(x, \beta) = \frac{x - x_1 - \rho + (\beta + 1)\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}} \quad R_p(x, t) = p_p(x) \cdot u_p(t) \quad D(x) = \alpha_d e^{\beta_d x} \quad \mathcal{G}(x) = k_a \cdot k_c \cdot \alpha_d \cdot \frac{\alpha_r(\alpha, \beta)}{\frac{\alpha_d}{\alpha_a} + \alpha_r(\alpha, \beta)} \cdot e^{\beta_d x} \quad \alpha_g(\alpha, \beta) \cdot (\beta_d + \beta - 1) + \alpha_m(\alpha, \beta)$$

$$\mathcal{M}(x) = \frac{\alpha \cdot \alpha_d}{\alpha_a + \alpha_r(\alpha, \beta)} \cdot \sigma \sqrt{2\pi} \cdot e^{\frac{(\beta_d-1)^2 \sigma^2}{2}} \cdot e^{(\beta_d-1)\rho} \cdot e^{(\beta_d-1)x} \quad y = \beta + \beta_D - 1 \quad \alpha_g(\alpha, \beta) \quad \bar{v}_0(x, \beta) = \frac{x - x_0 - \rho + (\beta + 1)\sigma^2}{\sigma\sqrt{2}}$$

$$I_z = I_{z=0} \cdot (1 - \text{albedo}) \cdot e^{-\int_0^z K_{ext}(z) dz} \quad \Delta = \frac{\lambda^2}{4} - \frac{4}{\sigma^2}$$

$$v_1 = \frac{x_1}{4} - \frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \quad f(y) = y \cdot e^{-\lambda y - (\lambda+1)y} + \frac{1}{k_c \cdot k_a} = 0 \quad \Delta = \frac{\lambda^2}{4} - \frac{4}{\sigma^2}$$

$$f'(y) = e^{\frac{\sigma^2}{2}(y^2 - \lambda y - (\lambda+1))} \cdot \sigma^2 \left[y^2 - \frac{\lambda}{2}y + \frac{1}{\sigma^2} \right]$$

$$u(x) = \alpha \cdot e^{\beta x} \quad \alpha \in \mathbb{R}_+^* \quad I_T = 2 \cdot (1 + \beta_T) \cdot \frac{x_T}{x_T^2 + 2 \cdot \beta_T \cdot x_T + 1} \Rightarrow x_T = \dots$$

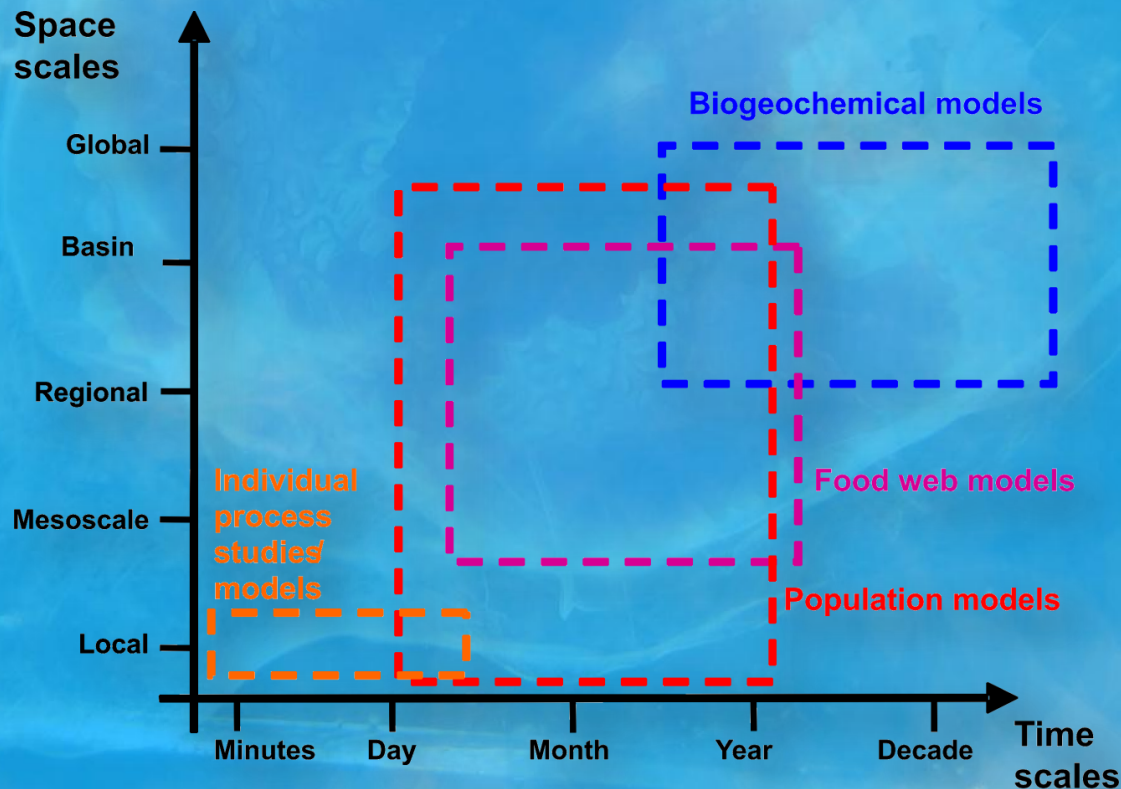
$$T = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{e^{-x} \cdot \mathcal{G}^*(x)} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \alpha_d \cdot k_a \cdot k_c (1 - \beta_d)} \left[e^{(1-\beta_d)x_1} - e^{(1-\beta_d)x_0} \right] \quad M_p^* = \frac{\alpha \cdot \alpha_g(\alpha, \beta)}{2 \cdot k_a \cdot k_c} \int_{x_0}^{x_1} \left[2 + \operatorname{erf}(\bar{v}_1(x, \beta)) - \operatorname{erf}(\bar{v}_0(x, \beta)) \right] e^{(\beta_d+\beta)x} \cdot dx$$

Intérêt des modèles basés en taille

V. MODÉLISATION DU ZOOPLANCTON

Les différents modèles

- Simplification de la réalité pour tester une hypothèse...
- Différents modèles pour différentes échelles (et différentes questions)



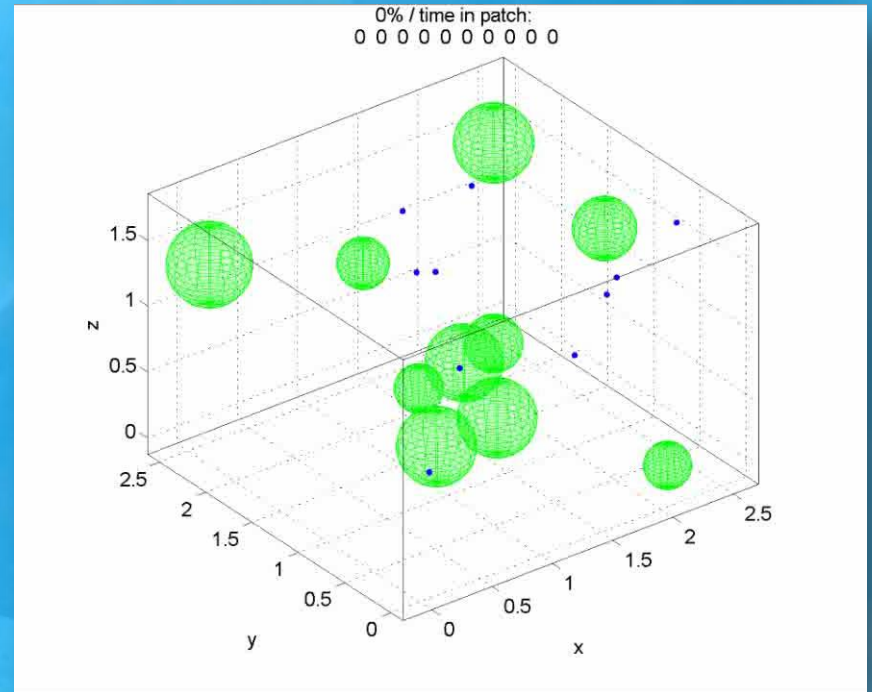
from Carlotti and Poggiale 2009

Les différents modèles

- Modèles individus centrés (IBM)



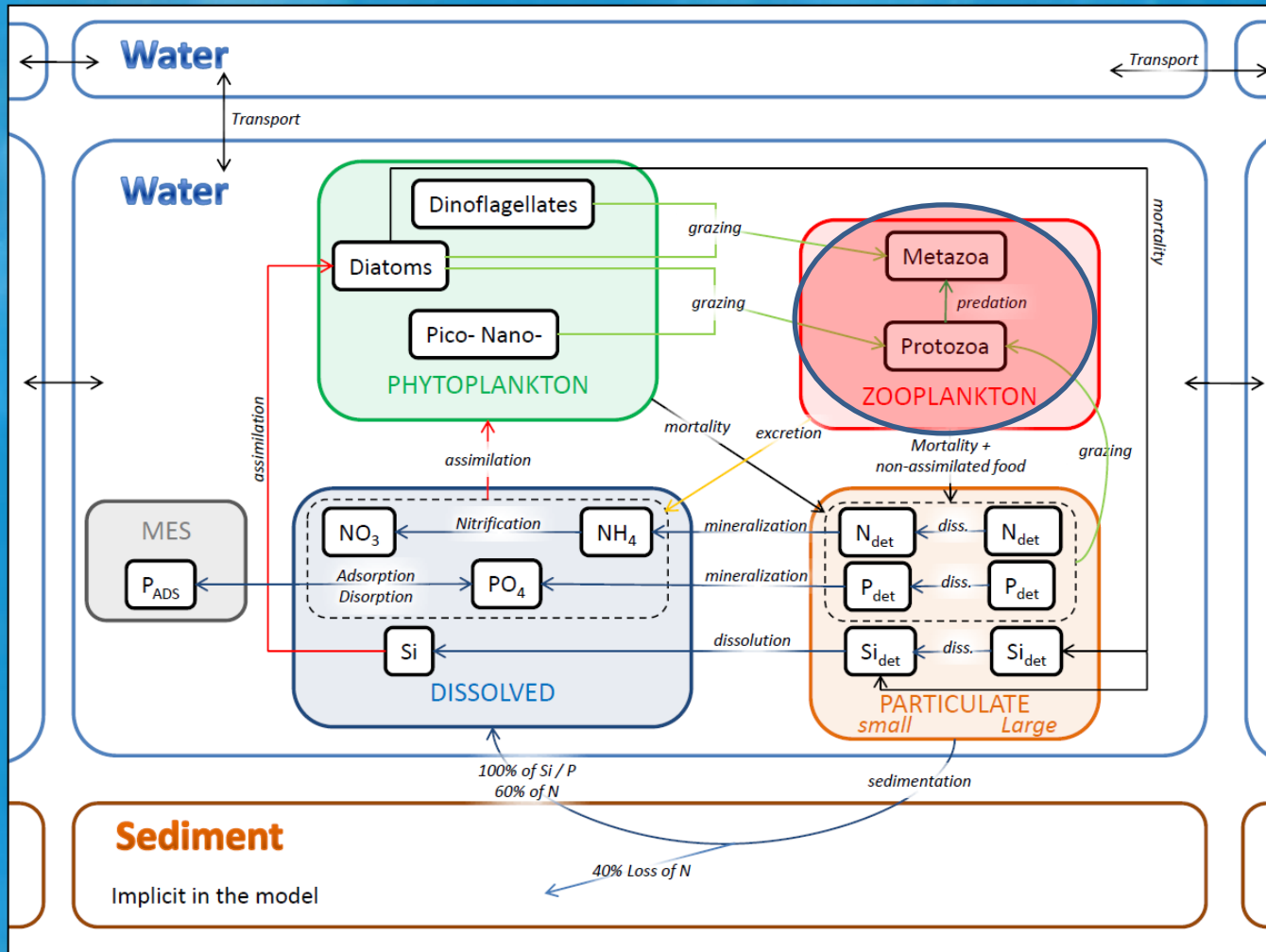
Simulated larval dispersal patterns from an offshore island in the Southern California Bight (Mitarai et al., 2009)



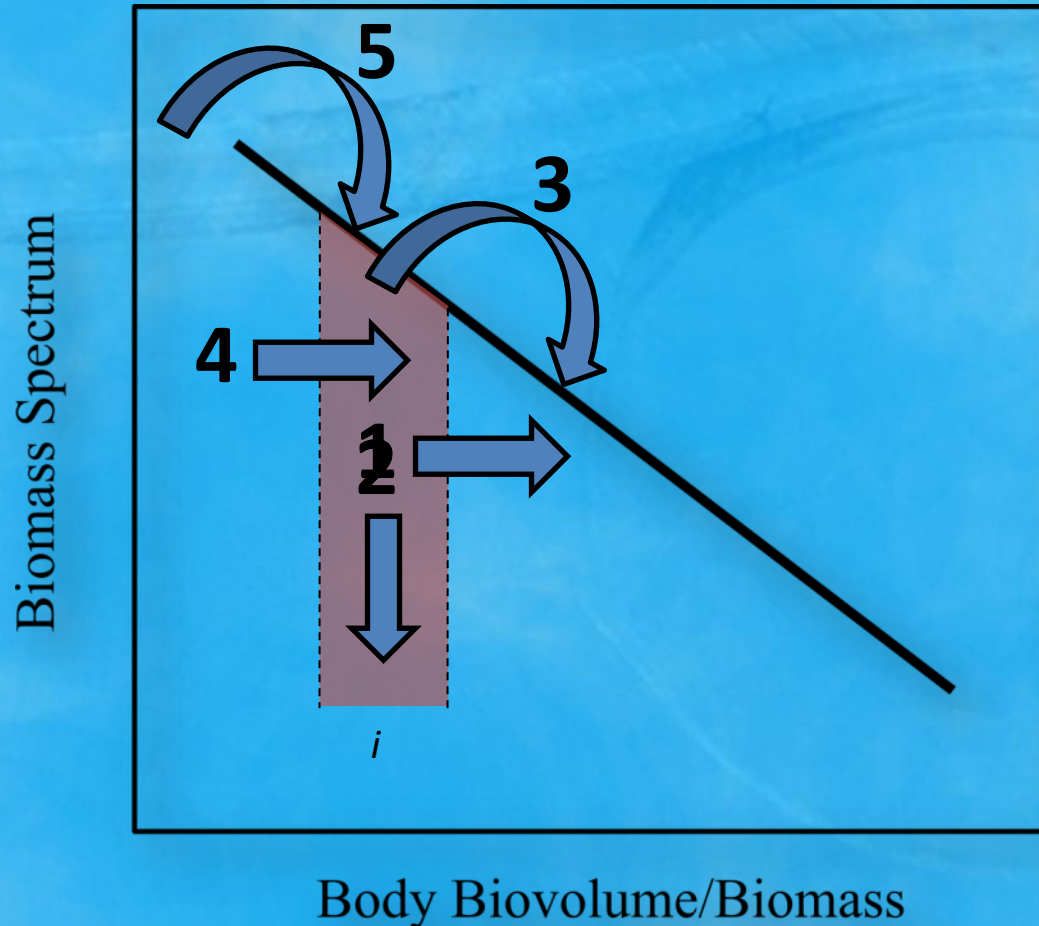
Matanoski & Hood 2006, An individual-based numerical model of medusa swimming behavior

Les différents modèles

- Modèles biogéochimique (NPZD): ex. ecoMARS3D



Les modèles structurés en taille



Classe de taille i au temps t
Changements à t_{+1} ?

Perte de biomasse:

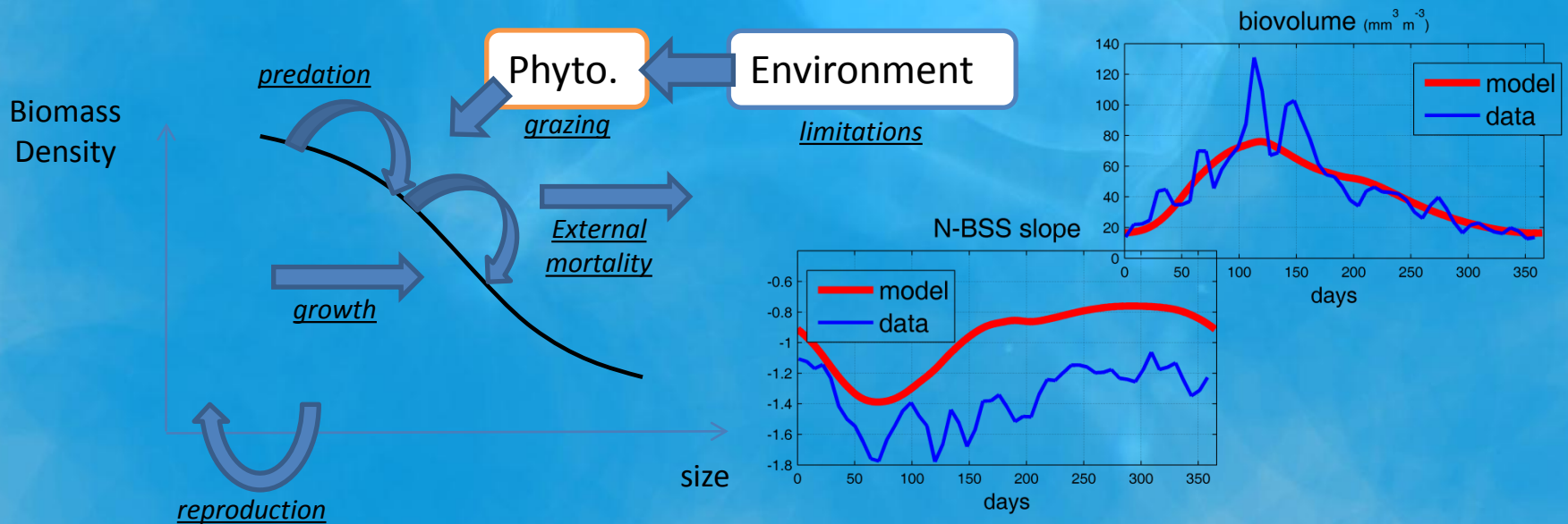
- 1 : croissance des individus
- 2 : mort naturelle
- 3 : prédation par zoo sup

Entrée de biomasse:

- 4 : croissance du zoo inf
- 5 : predation sur le zoo inf

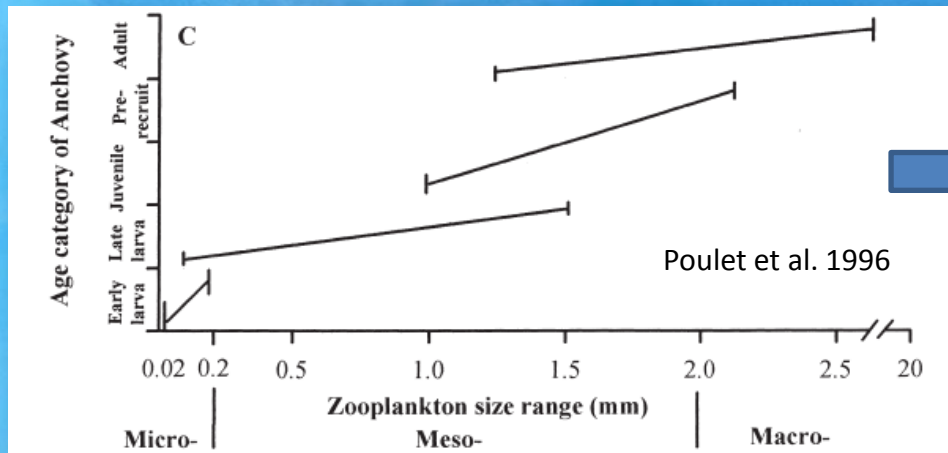
Les modèles structurés en taille

- Modèle continue -> équation de transport
 - Dérivées partielles sur le temps et la taille
 - Structure différentes des modèles NPZD



Contexte

- Projet REPROdUCE:
 - Recrutement de l'anchois et de la sardine
 - Modéliser la nourriture (zooplancton) disponible
 - Utilisation d'ecoMARS3D



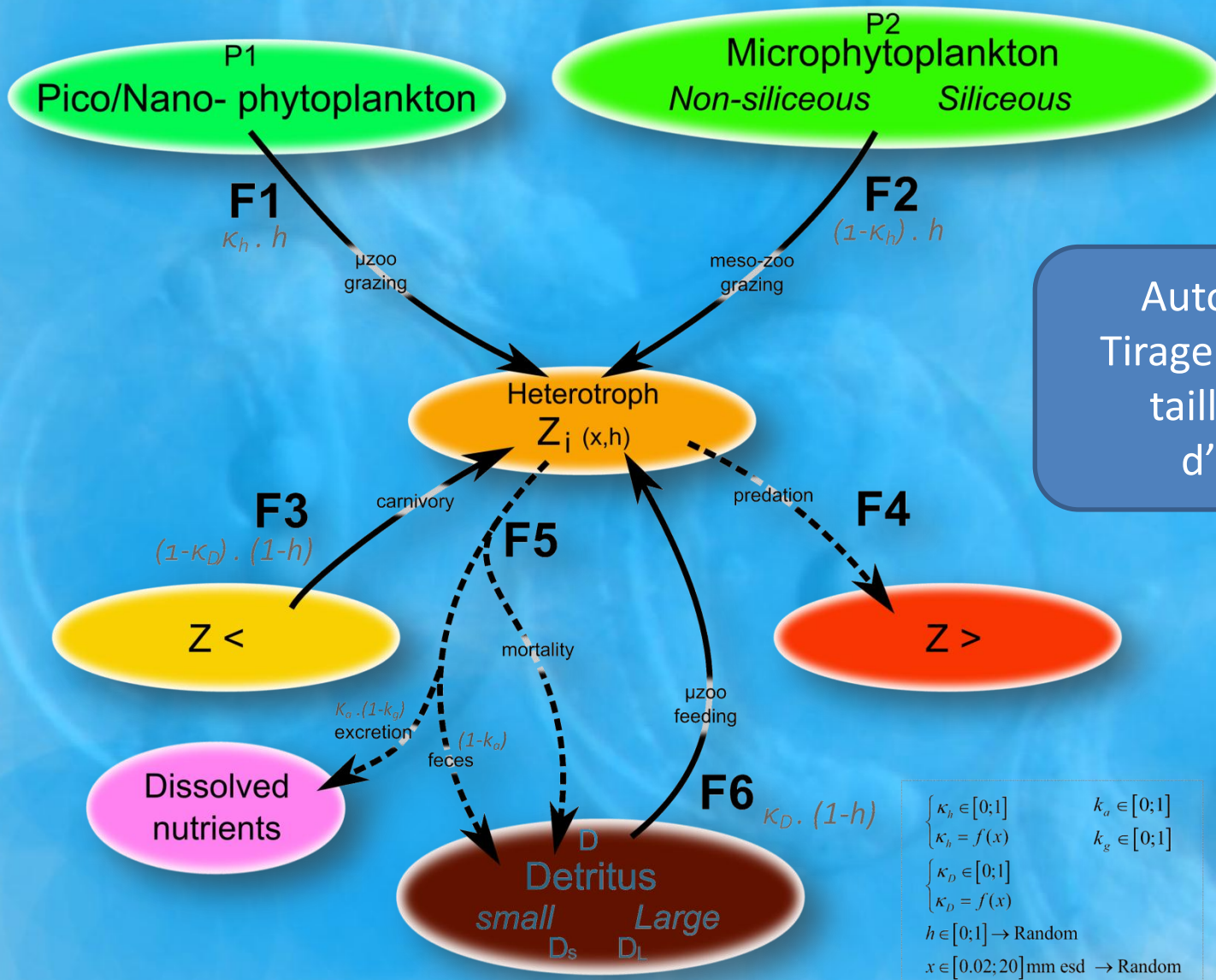
Très forte relation entre âge de l'anchois (et sardine) et taille de leurs proies

- Intégration de la structure en taille dans un modèle biogéochimique

Nouveau modèle

- Intégration de la taille sans changer la structure de type NPZD
 - Modèle $N_3P_3Z_2D_2 \rightarrow N_3P_3Z_{400}D_2$
- Génération d'un grand nombre de Zoo
 - Taille et préférence alimentaire aléatoire
- Pour chaque zoo:
 - Taux métabolique, taille de proie optimum... déterminé à partir de relations allométriques (empiriques) depuis la taille

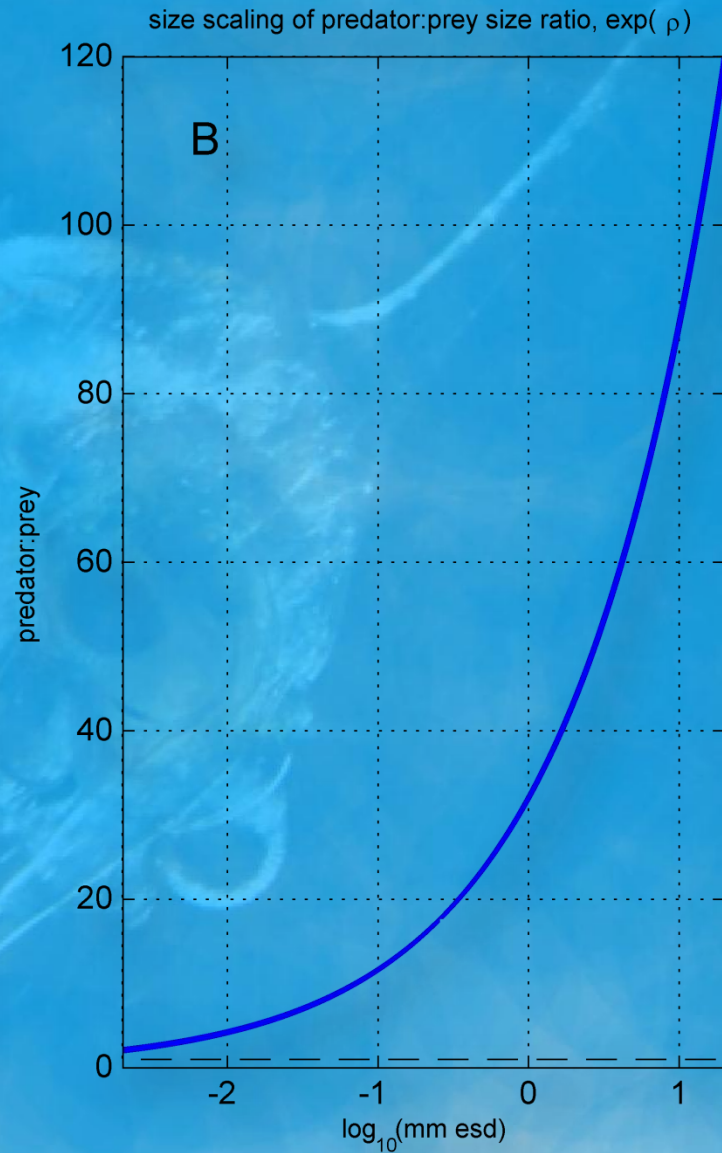
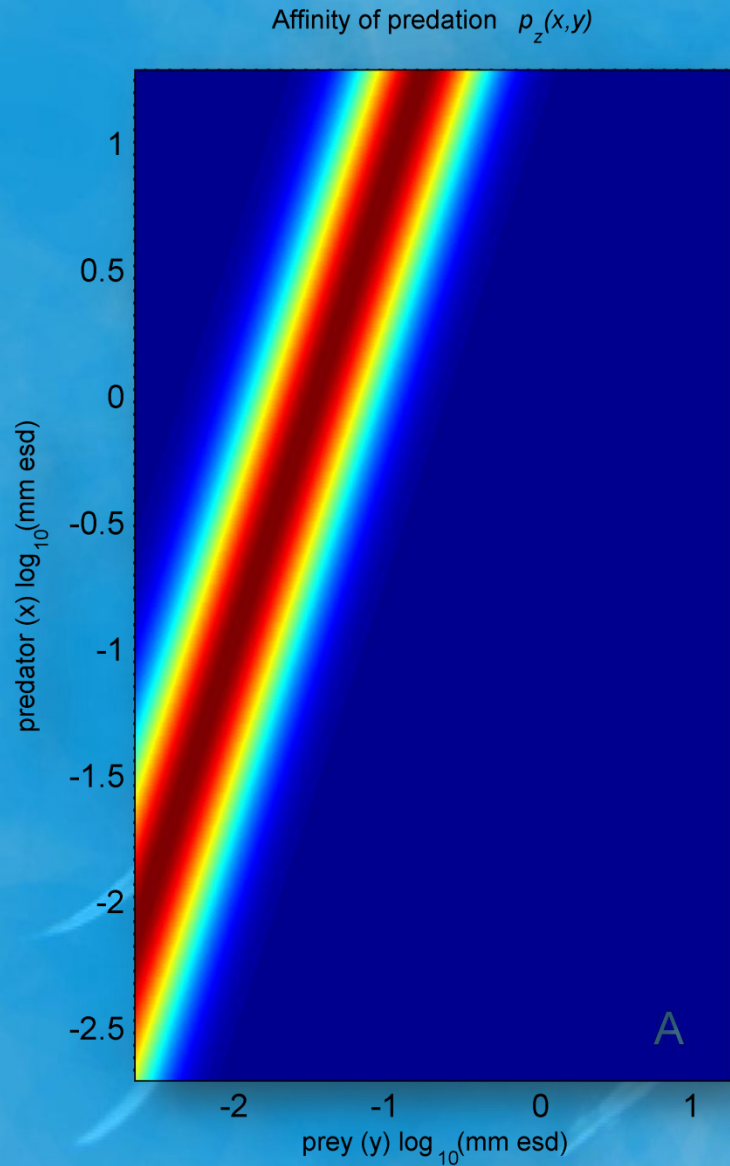
Nouveau modèle



Auto-émergent :
Tirage aléatoire de la
taille et du taux
d'herbivorie

$$\begin{cases}
 \kappa_h \in [0;1] & \kappa_a \in [0;1] \\
 \kappa_h = f(x) & \kappa_g \in [0;1] \\
 \kappa_D \in [0;1] \\
 \kappa_D = f(x) \\
 h \in [0;1] \rightarrow \text{Random} \\
 x \in [0.02; 20] \text{ mm esd} \rightarrow \text{Random}
 \end{cases}$$

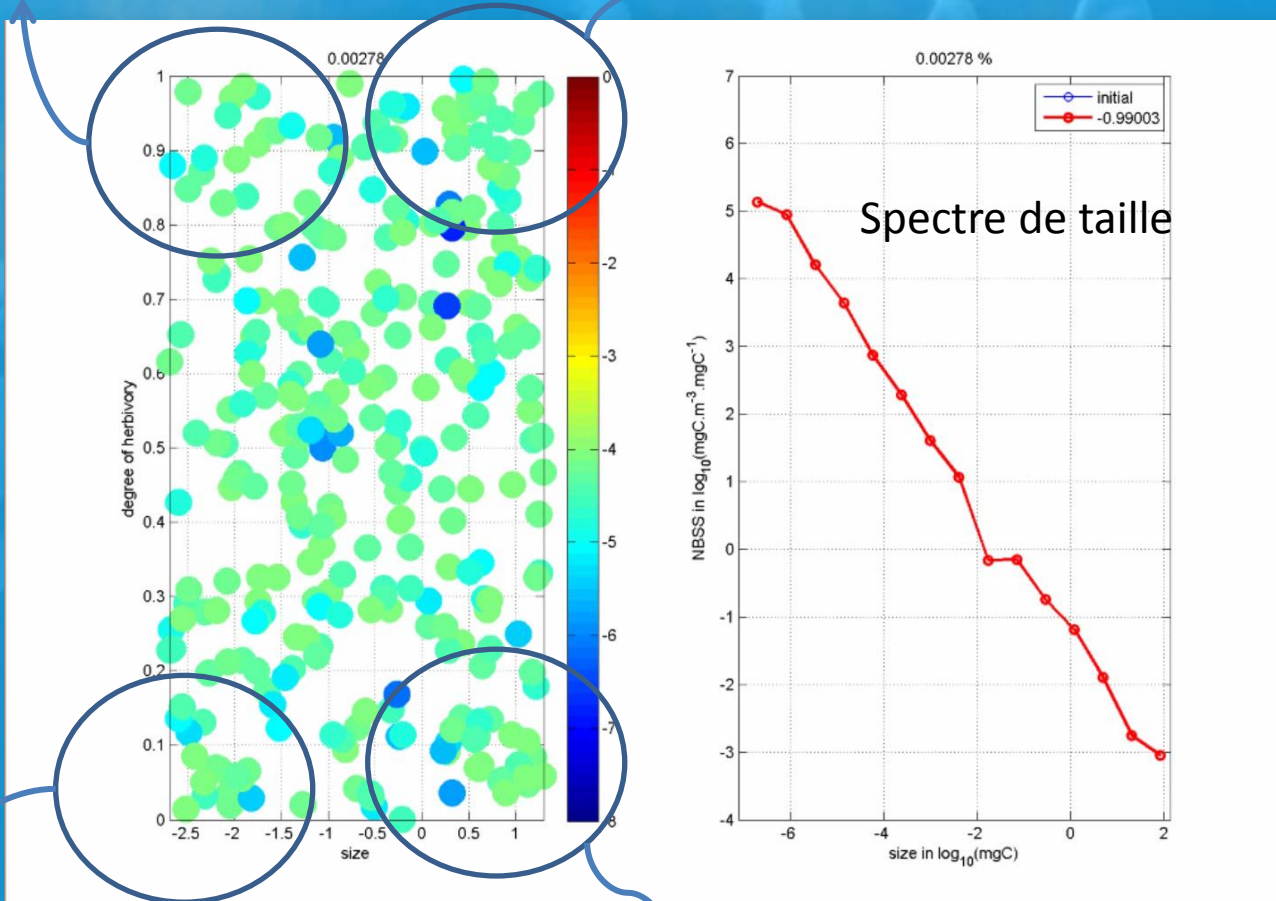
Relations allométriques



Exemple de simulation

Petits herbivores (pico/nano)

Gros herbivores (microphyto.)



Petits détritivores

Gros carnivores

Avantage du modèle

- Modèle très flexible
- Structure NPZD (« spin up », temps de calcul...)
- Spectre de taille en sortie
- Nombre de paramètres = (voir inférieur) à ecoMARS
- Principe de l'auto-émergence

- Mais il reste beaucoup à faire...

Conclusions générales

- Zooplancton -> compartiment peu étudié malgré (entre autres):
 - Rôle central dans les cycles biogéochimiques
 - Son rôle de sentinelle des changements climatiques
- Le zooplancton reste encore un monde mystérieux rempli de formes aussi belles que variées...

Merci à tous

photo et vidéo:

- Franck Prejger, Noé Sardet, Maria-Grazia Mazzocchi, Humberto Gonzales, Thomas Bresinsky, Steeve Comeau, Christophe Mocquet, David Luquet, Ornella Passafiume, Coline Lazard
- TARA Océan, CNRS LOV Villefranche-sur-mer
- IFREMER
- DTU Aqua -> Thomas Kiørboe