

Modélisation mécanistique & statistique en écologie marine : Exemples pour l'étude du plancton marin

Sakina-Dorothee Ayata

Maître de conférences HDR (Sorbonne Université)

Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-mer (LOV)

Institut de la Mer de Villefranche (IMEV)





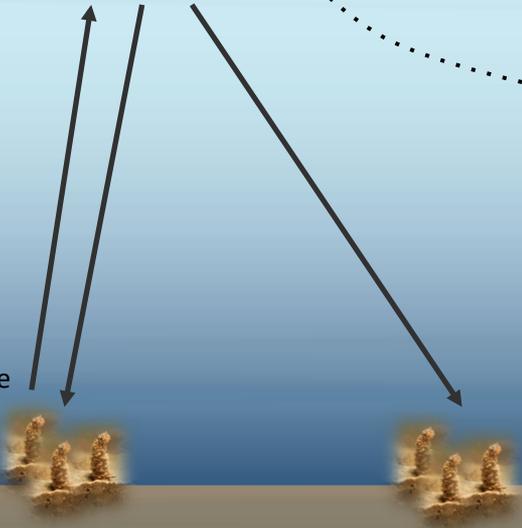
Rôles du plancton dans la **structure** et le fonctionnement des écosystèmes

- Rétention
- Migration
- Colonisation
- Perte

Mérophton



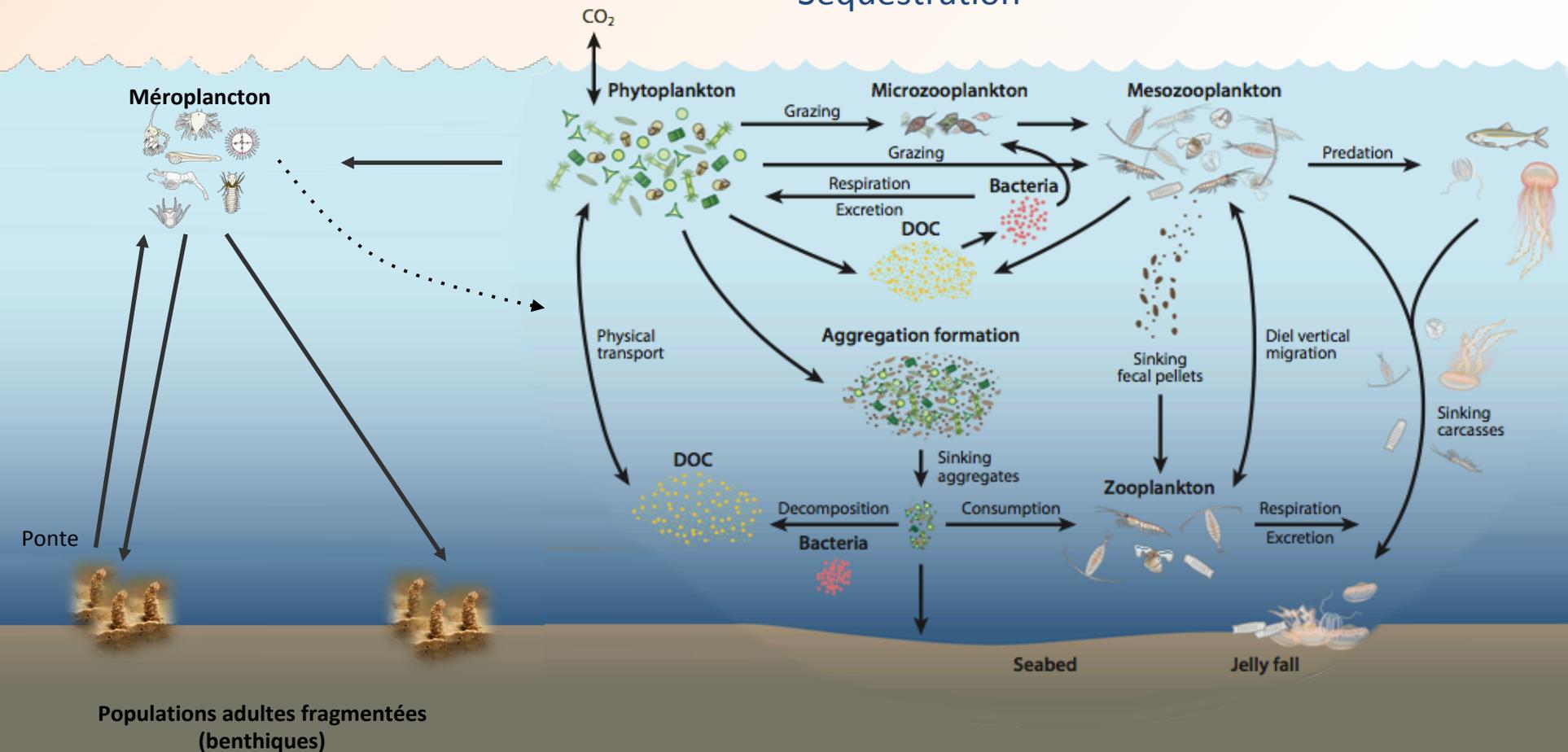
Ponte



Populations adultes fragmentées
(benthiques)

Rôles du plancton dans la structure et le **fonctionnement** des écosystèmes

- Rétention
- Migration
- Colonisation
- Perte
- Production primaire
- Production secondaire
- Reminéralisation
- Export
- Séquestration

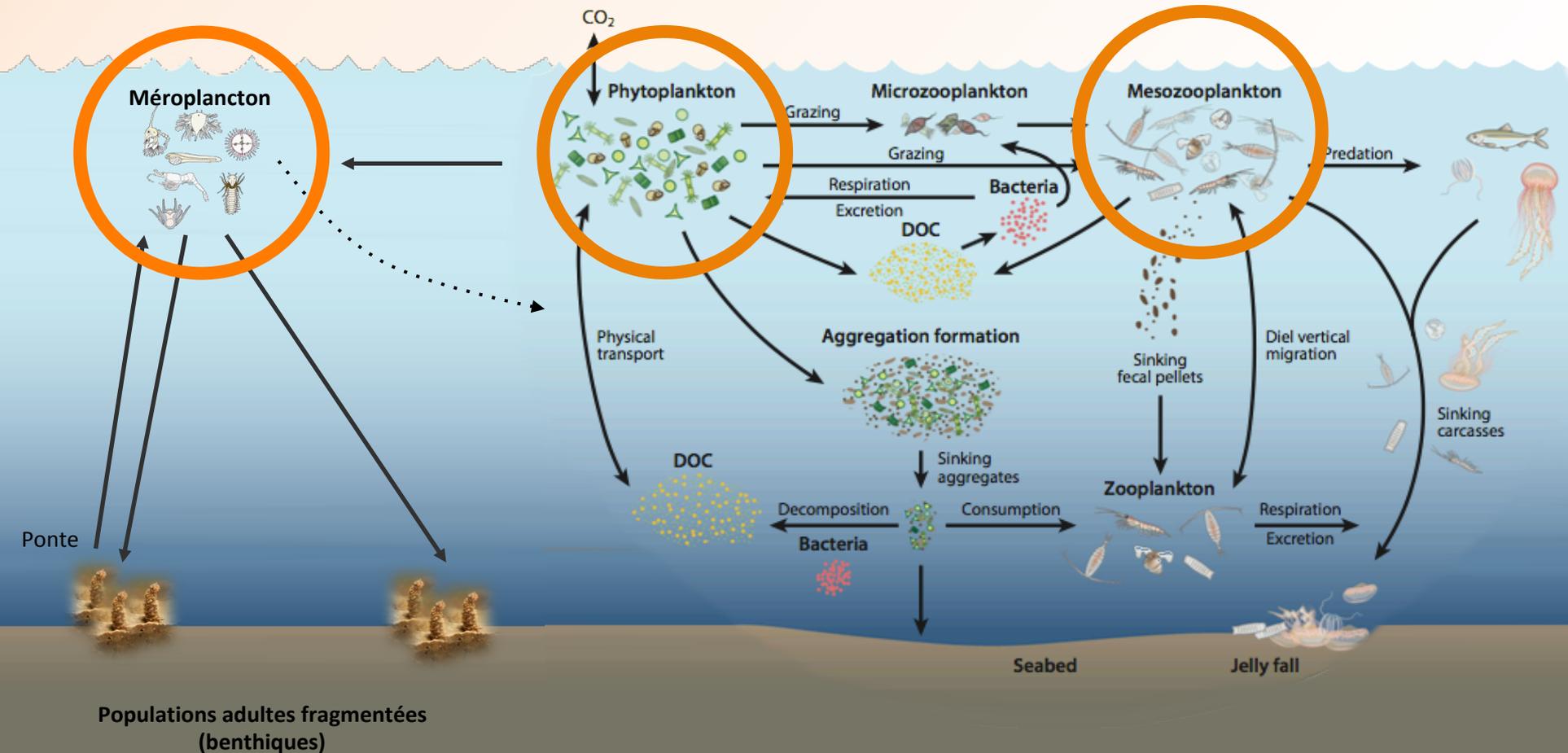


Rôles du plancton dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes

Dispersion larvaire et connectivité

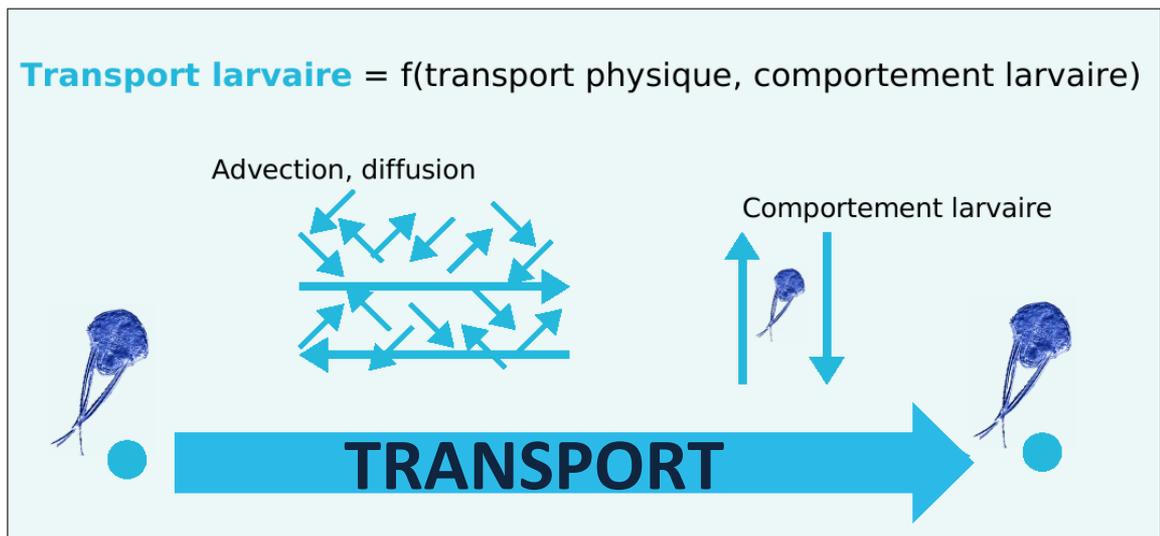
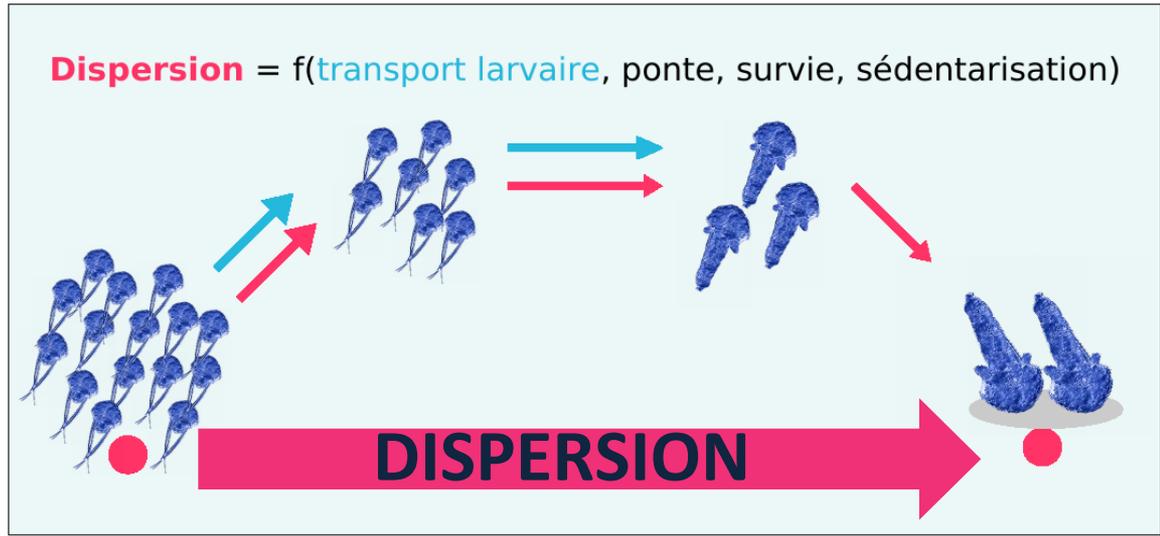
Production primaire et plasticité du phytoplancton

Biogéographie du zooplancton



Connectivité et dispersion larvaire

Méropplancton (larves planctoniques)



Redessiné d'après Pineda et al. (2007)

Les équations du transport larvaire

Equation d'advection-diffusion-mortalité (contexte Eulérien)

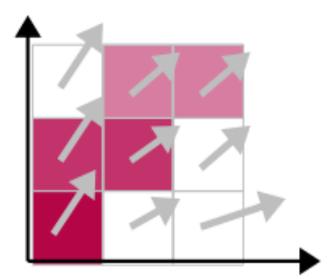
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \underbrace{u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}}_{\text{Terme d'advection}} - \underbrace{K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}}_{\text{Terme de diffusion}} - \underbrace{\mu C}_{\text{Terme de mortalité}} = 0$$

u, v, w : vitesses du courant dans les 3 directions de l'espace

K_x, K_y, K_z : diffusivités dans les 3 directions de l'espace

μ : taux de mortalité

Contexte Eulérien



$$\frac{\partial}{\partial t}$$

Dérivée partielle de la concentration $C(t,x,y,z)$ par rapport au temps en tout point de l'espace

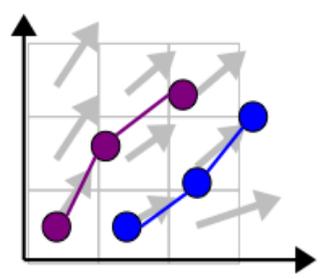
Les équations du transport larvaire

Transport individuel (contexte Lagrangien)

$$\frac{d\vec{X}_i}{dt} = \underbrace{\vec{U}(\vec{X}_i, t)}_{\text{Terme d'advection}} + \underbrace{\vec{U}'(\vec{X}_i, t)}_{\text{Terme de diffusion}} + \underbrace{\vec{u}_{sp}(\vec{X}_i, t)}_{\text{Comportement individuel}}$$

e.g., marche aléatoire

Contexte Lagrangien



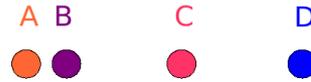
$\frac{d}{dt}$

Dérivée des coordonnées individuelles X_i par rapport au temps (trajectoire pour chaque individu i)

Individual Based Model (IBM)

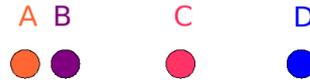
Comment décrire la dispersion?

1) Populations locales

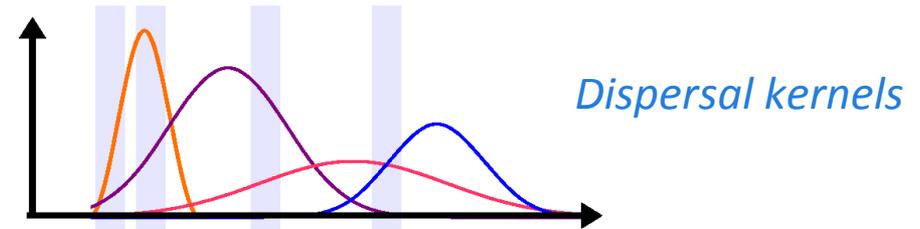


Comment décrire la dispersion?

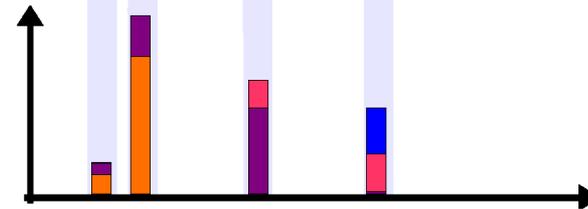
1) Populations locales



2) Noyaux de dispersion

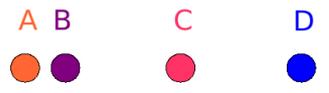


3) Densité et origine des recrues

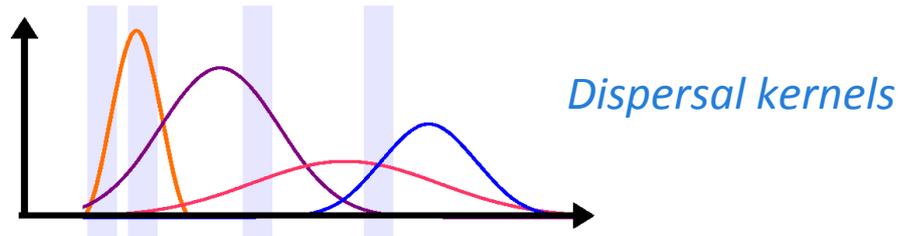


Comment décrire la dispersion?

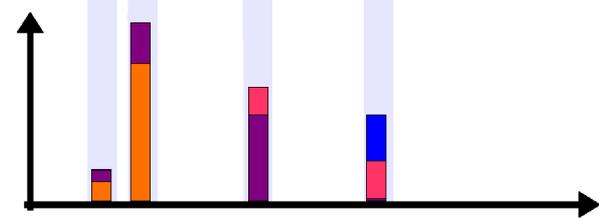
1) Populations locales



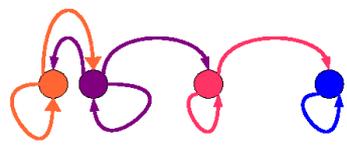
2) Noyaux de dispersion



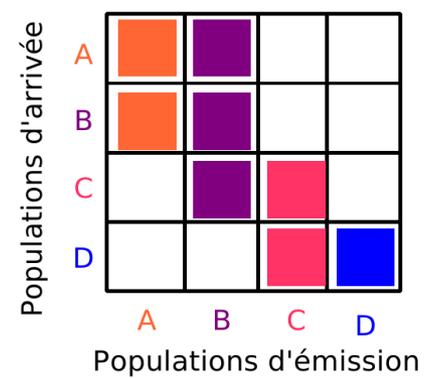
3) Densité et origine des recrues



4) Connectivité (échanges larvaires)

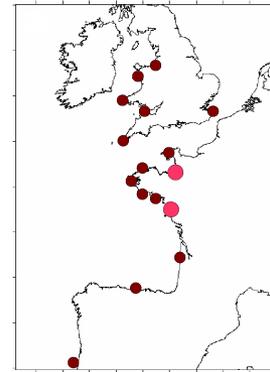


5) Matrice de connectivité



Connectivity matrix

Exemple 1 : Modélisation de la dispersion pour la conservation

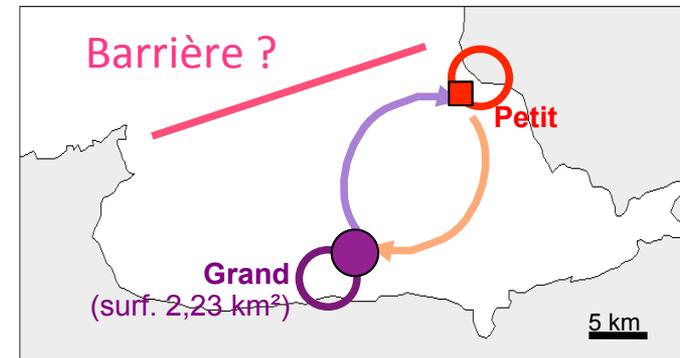


● Récifs de *Sabellaria alveolata*
● Présence signalée de *Sabellaria alveolata* en plaquage



Les récifs d'Hermelles

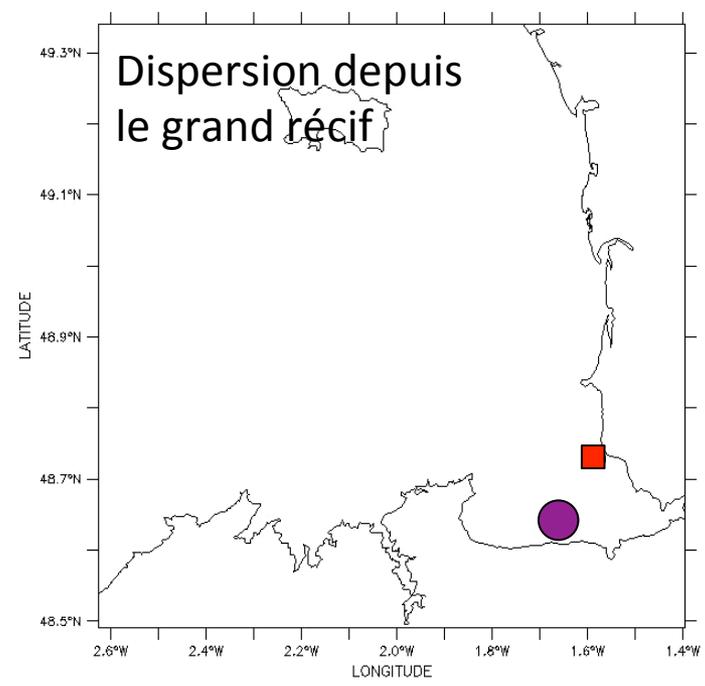
Récifs biogéniques de *Sabellaria alveolata*



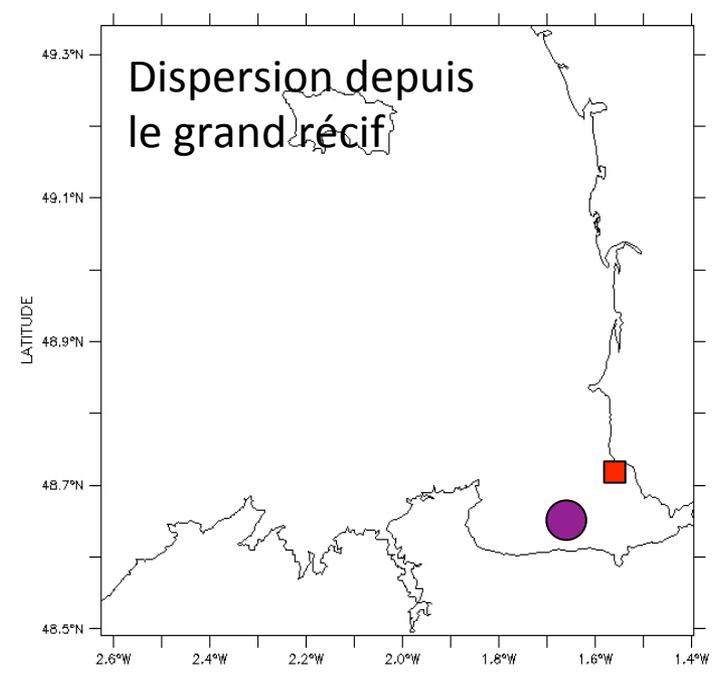
Facteurs bio-physiques assurant la pérennité des récifs ?

Comment les protéger ?

Exemple 1 : Modélisation de la dispersion pour la conservation



Simulation sans vent :
Piégeage par un tourbillon côtier



Simulation avec vent :
La modification de la position du tourbillon
favorise la rétention à l'échelle de la baie

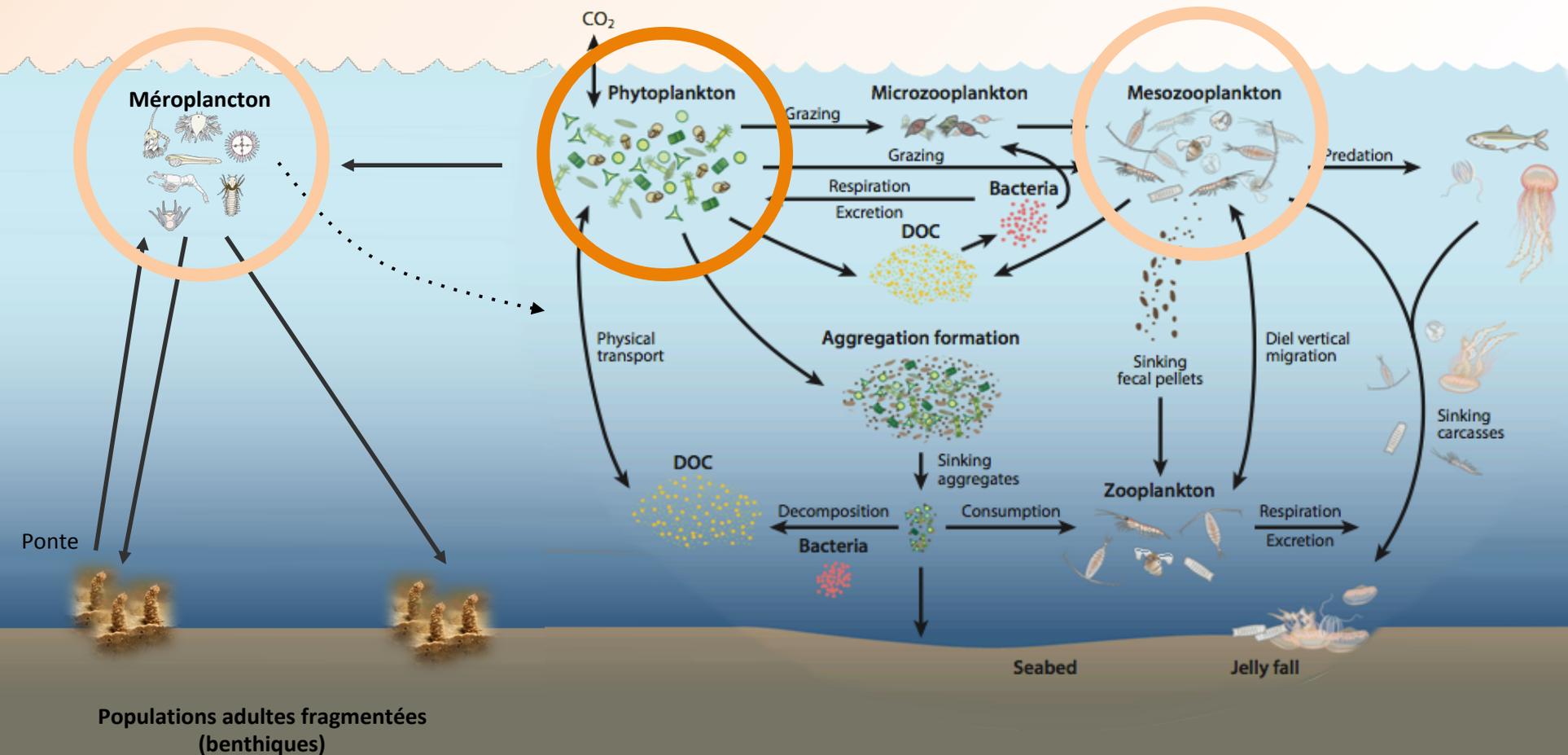
Ponte mai 2002

Rôles du plancton dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes

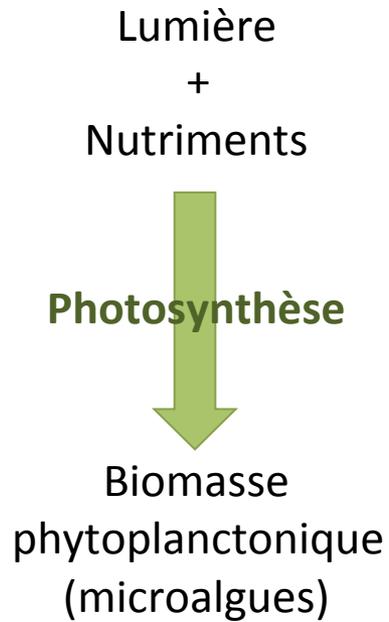
Dispersion larvaire
et connectivité

Production primaire
et plasticité du
phytoplancton

Biogéographie
du zooplancton



Photosynthèse et phytoplancton



Le phytoplancton
approvisionne les réseaux
trophiques en biomasse et
régule le CO₂ atmosphérique
et donc le climat

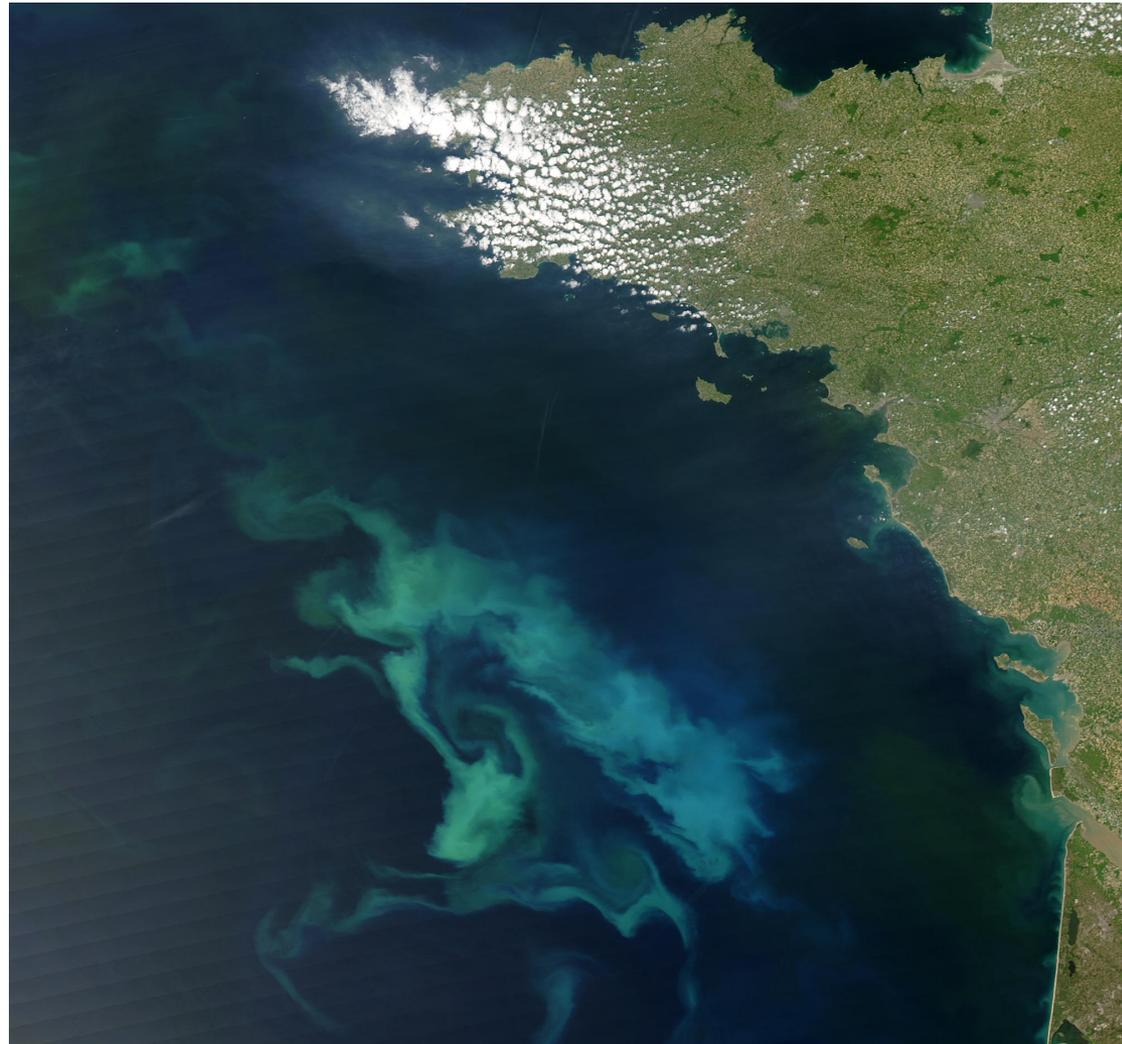
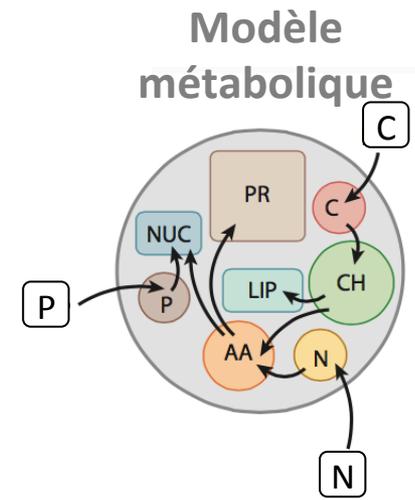
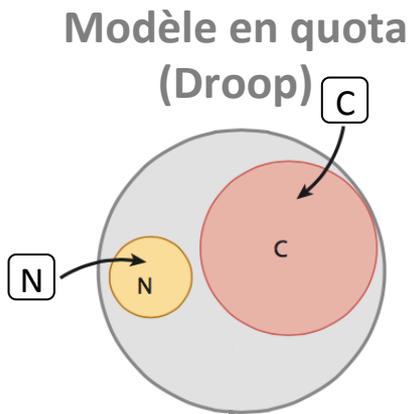
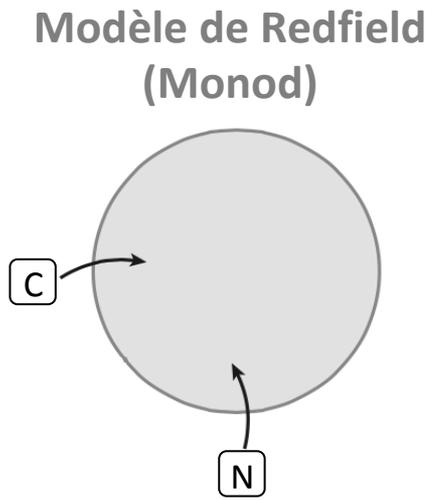


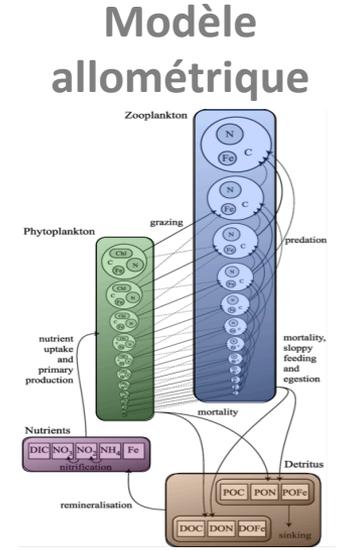
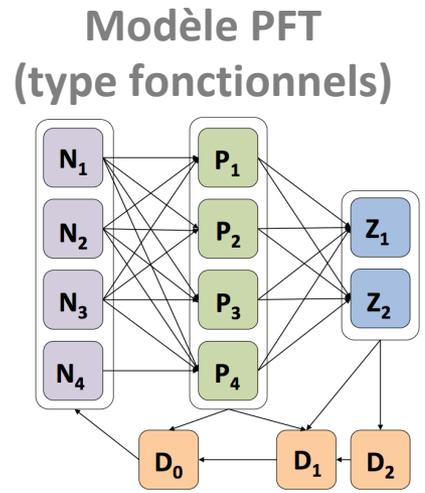
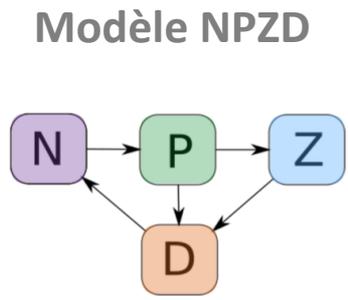
Image satellite – MODIS – Mai 2004 © Nasa

Modélisation de la production primaire

Au niveau de la cellule (fixation du carbone)



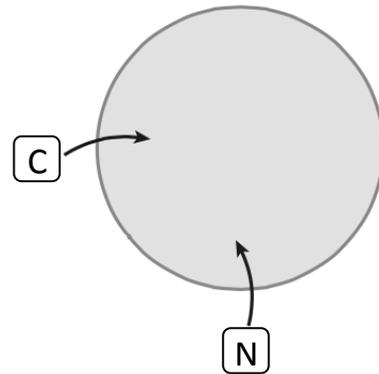
Au niveau de l'écosystème (interactions trophiques)



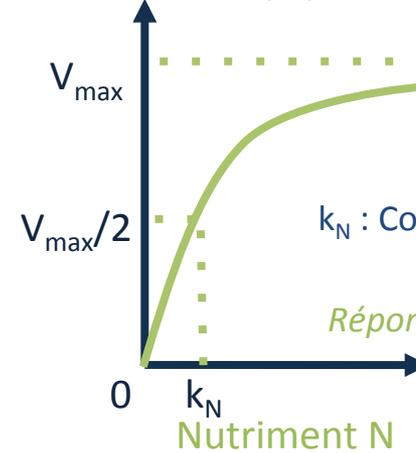
Modélisation de la production primaire

Au niveau de la cellule (fixation du carbone)

Modèle de Redfield (Monod)



Assimilation $V(N)$



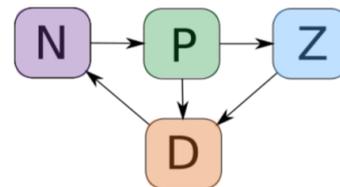
Monod (1942; 1984)

$$V(N) = V_{max} \cdot \frac{N}{k_N + N}$$

k_N : Constante de demi-saturation

Réponse fonctionnelle de type II

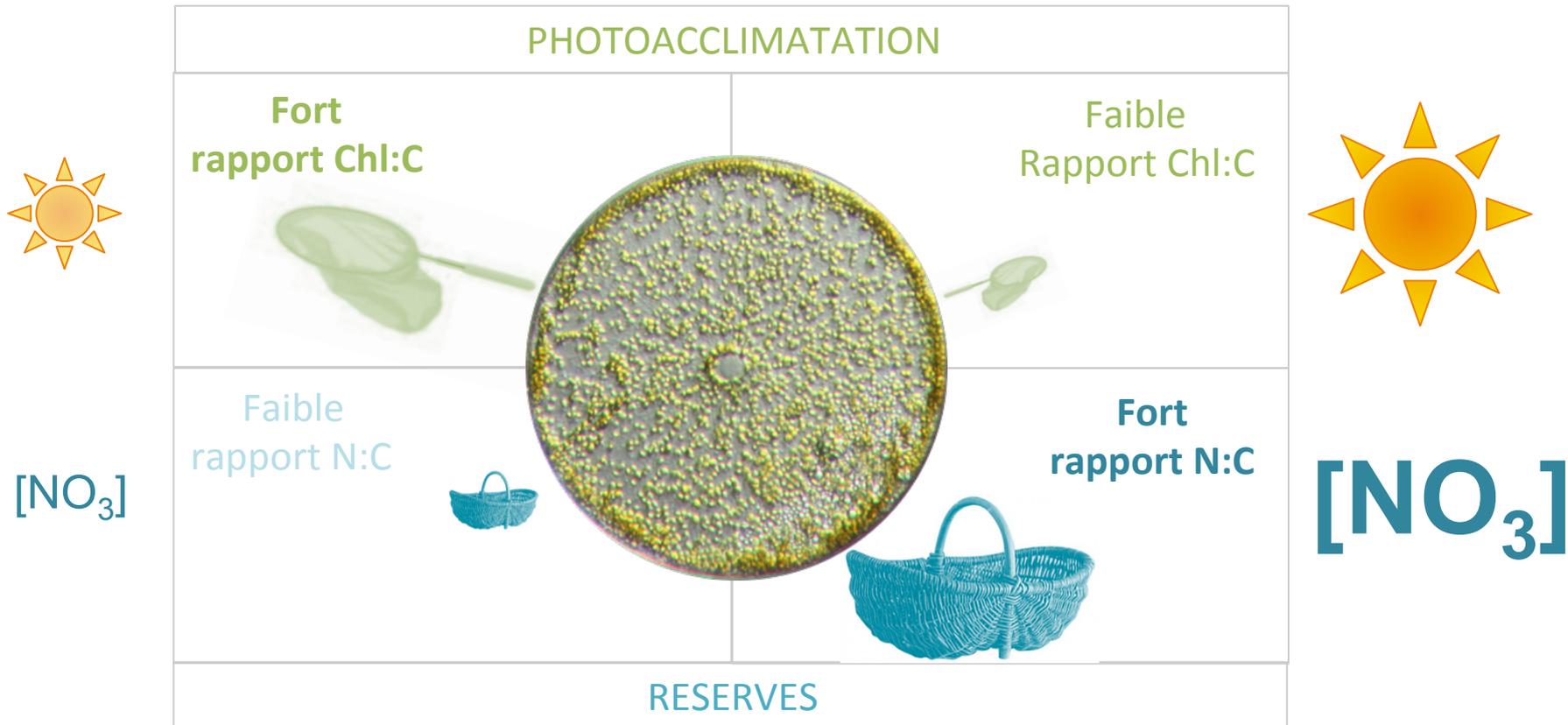
Modèle NPDZ



Au niveau de l'écosystème (interactions trophiques)

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -f_1(\cdot)N + f_2(\cdot)D \\ \frac{dP}{dt} = +f_1(\cdot)N - f_3(\cdot)P - f_4(\cdot)P \\ \frac{dZ}{dt} = +f_3(\cdot)P - f_5(\cdot)Z \\ \frac{dD}{dt} = +f_4(\cdot)P + f_5(\cdot)Z - f_2(\cdot)D \end{cases}$$

Exemple 2 : Prise en compte de la plasticité du phytoplancton dans les modèles biogéochimiques

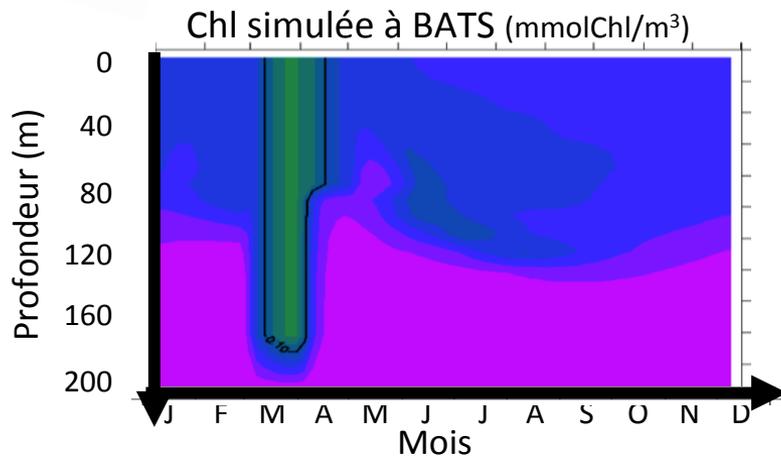


Conséquences sur les prédictions des flux de carbone ?

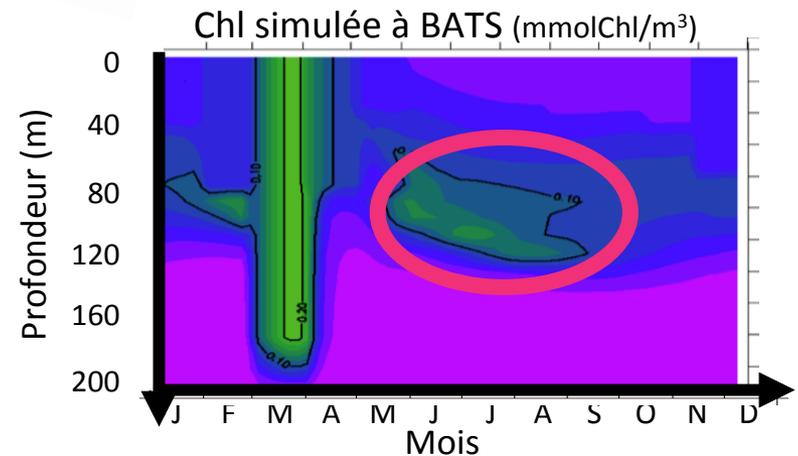
Exemple 2 : Prise en compte de la plasticité du phytoplancton dans les modèles biogéochimiques

X

Sans photoacclimatation
(rapport Chl:C constant)



Avec photoacclimatation
(rapport Chl:C variable)



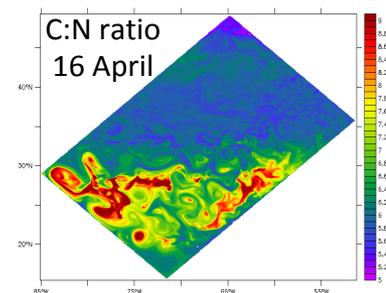
La photoacclimatation est nécessaire pour représenter le maximum de chlorophylle en subsurface présent l'été en zone oligotrophe



Nécessité d'un rapport C:N variable pour correctement représenter la production primaire

Ayata et al. 2013 J. Mar. Sys.

Ayata et al. 2014 Geophysical Res. Letters

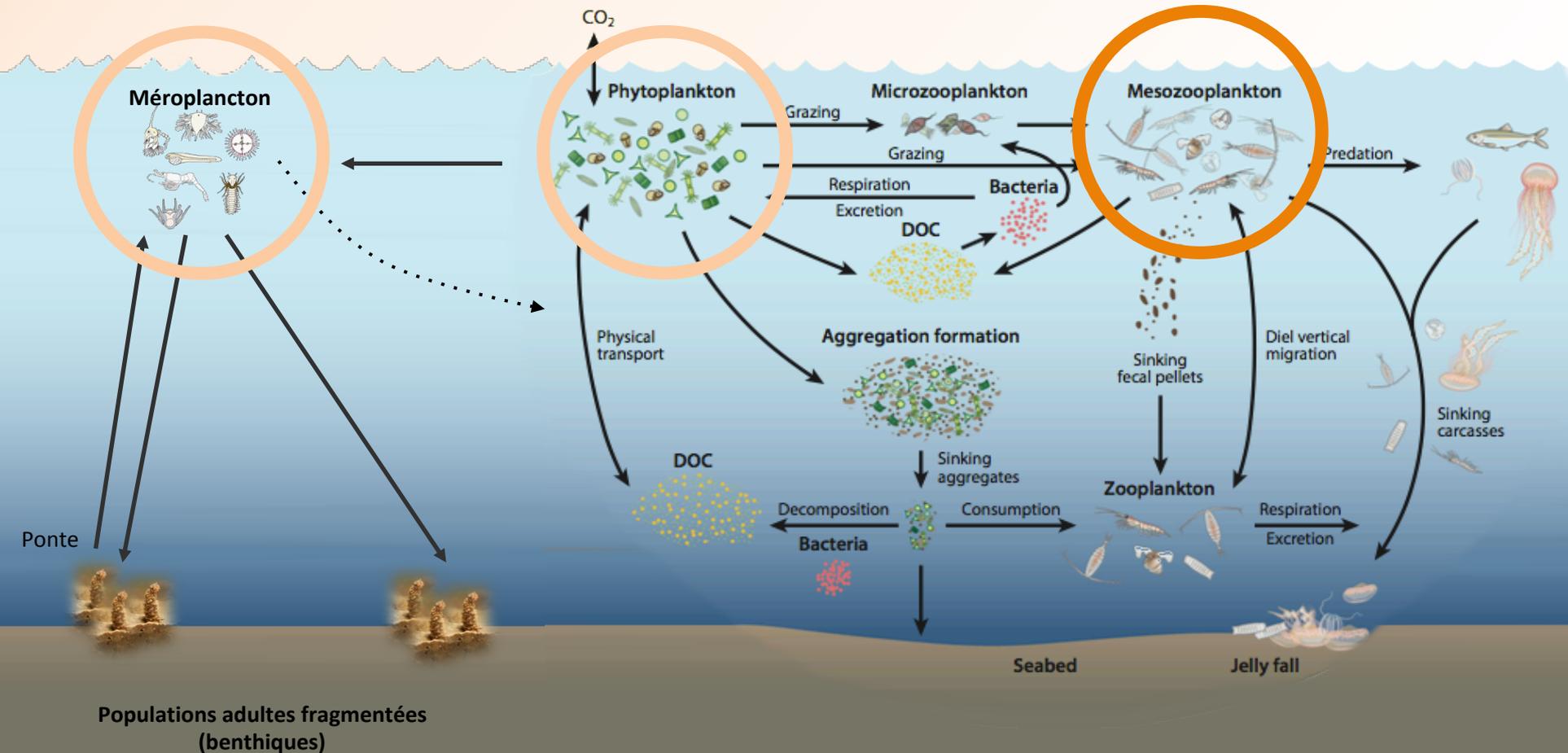


Rôles du plancton dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes

Dispersion larvaire
et connectivité

Production primaire
et plasticité du
phytoplancton

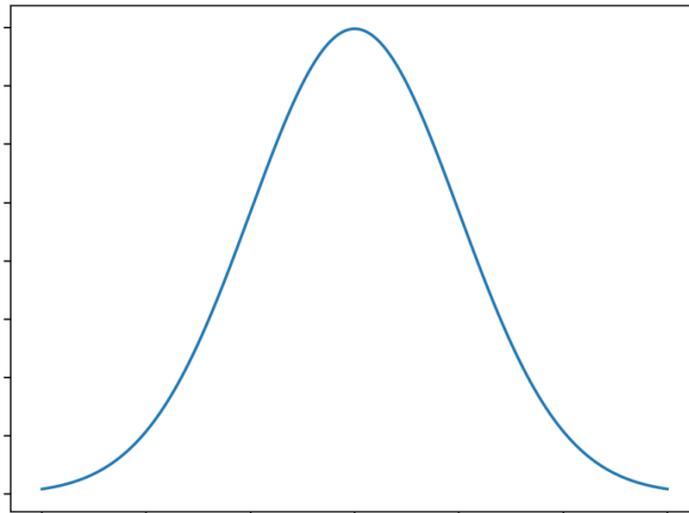
Biogéographie
du zooplancton



Distribution des espèces

Le concept de niche écologique (Hutchinson, 1957)

Probabilité
de présence
d'une espèce

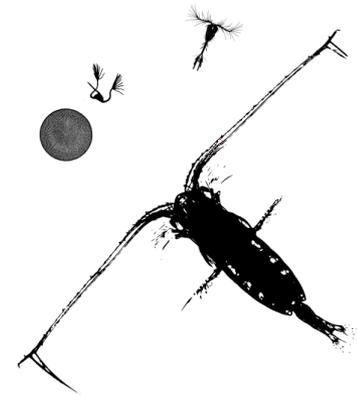
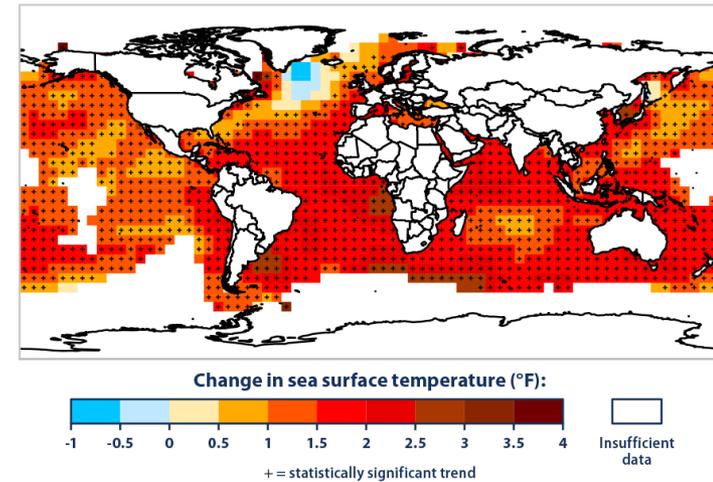


Environnement (gradient)

Objectifs :

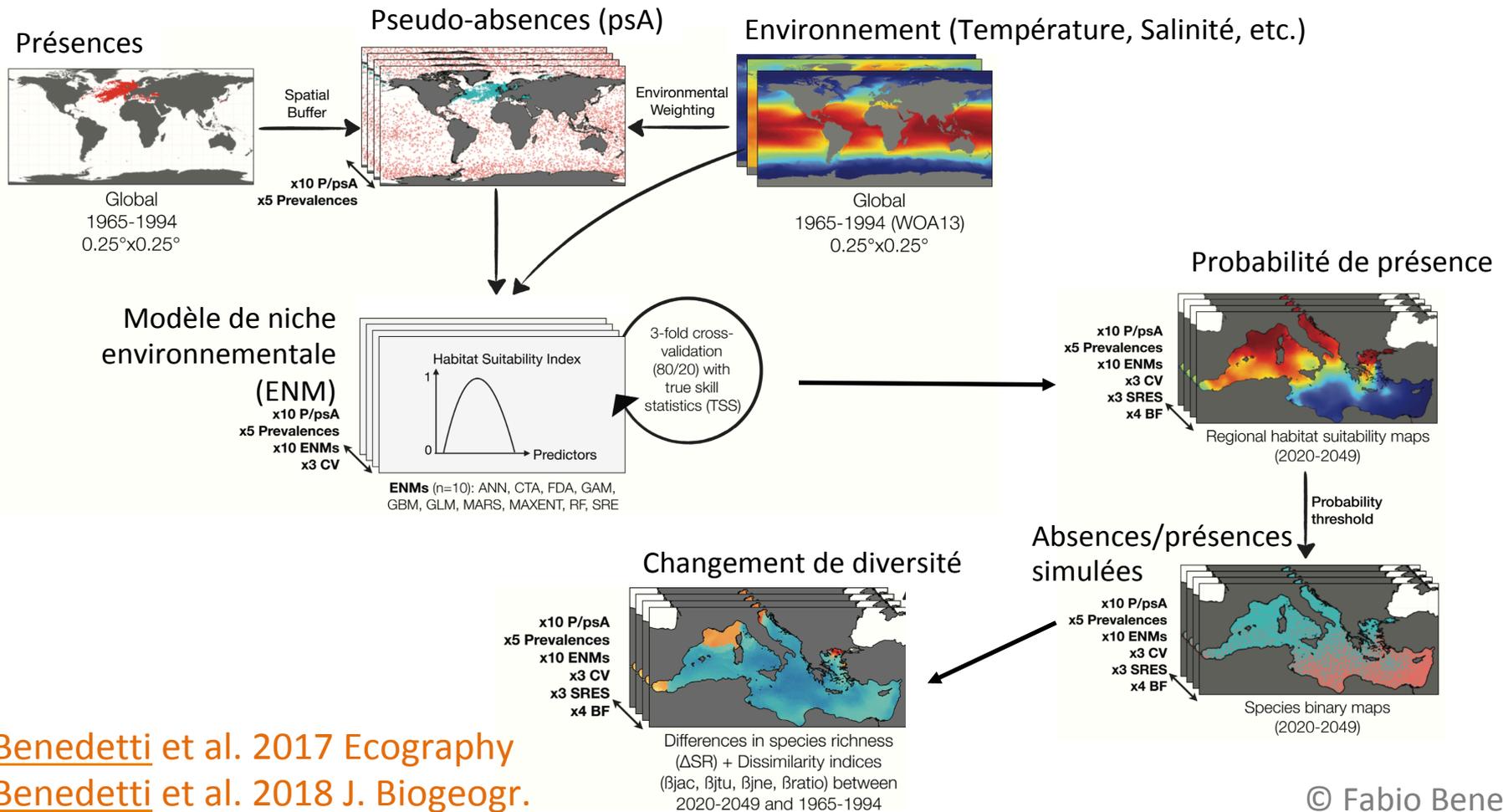
- 1) Identifier les facteurs influençant la distribution des espèces
- 2) Prédire l'impact du changement climatique sur la distribution et la diversité

Change in Sea Surface Temperature, 1901–2015 ©IPCC 2013



Modélisation statistique de la distribution des espèces

Modèles statistiques construits à partir des corrélations entre la présence/absence et/ou l'abondance d'une espèce et les conditions environnementales

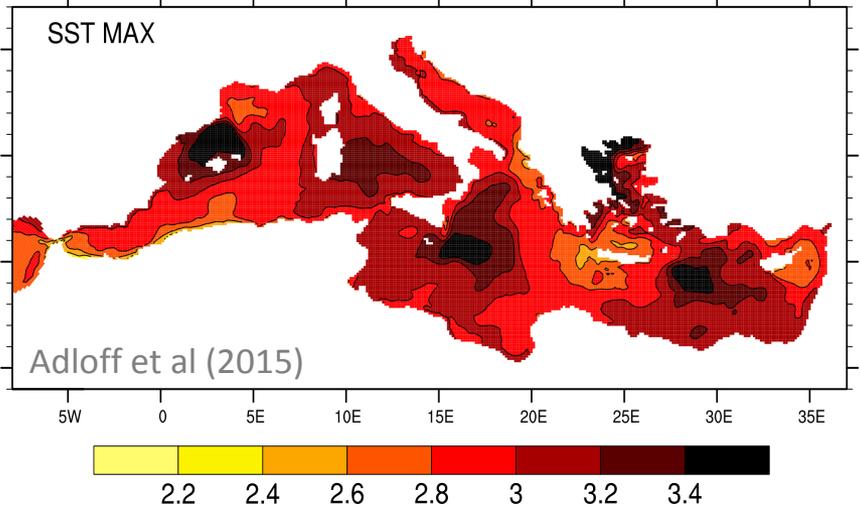


[Benedetti et al. 2017 Ecography](#)

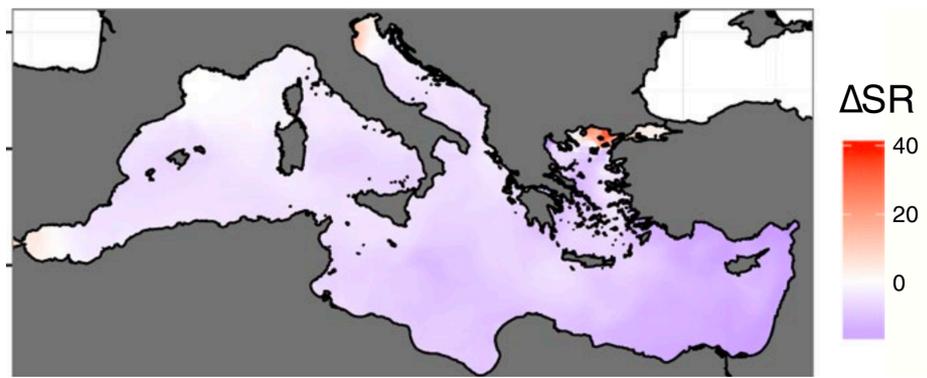
[Benedetti et al. 2018 J. Biogeogr.](#)

Impact du changement climatique sur la biodiversité

Température de surface simulée (anomalies) en 2100



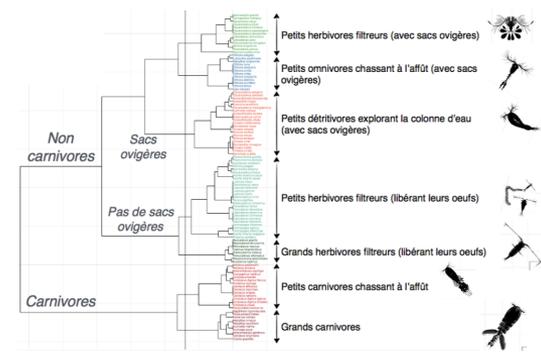
Diversité taxonomique (nb espèces)



Perte d'espèces : diminution de la diversité taxonomique

Impact sur la diversité fonctionnelle ?

- ⇒ Les espèces les plus affectées font partie de différents groupes fonctionnels
- ⇒ Faible impact sur la diversité fonctionnelle (fort redondance fonctionnelle)



[Benedetti et al. 2017 Ecography](#)
[Benedetti et al. 2018 J. Biogeogr.](#)
[Benedetti et al. 2018 Diversity & Distribution](#)



Approche fonctionnelle et modélisation



Contents lists available at ScienceDirect

Marine Genomics

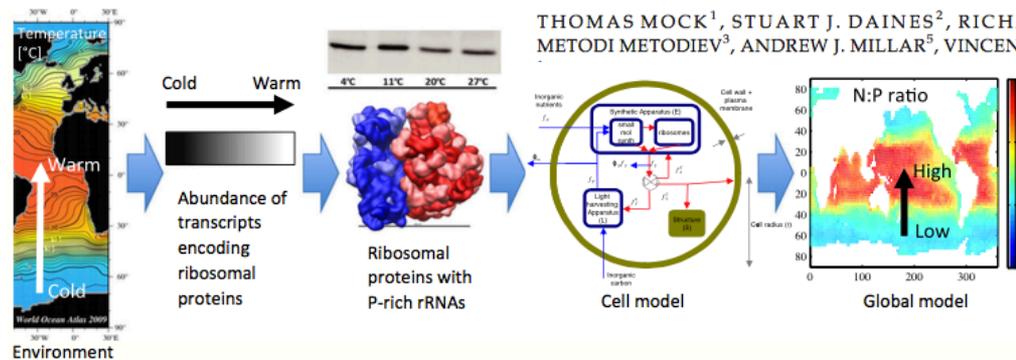
journal homepage: www.elsevier.com/locate/margen



Review

Modelling plankton ecosystems in the meta-omics era. Are we ready?

Krzysztof Franciszek Stec^{a,1}, Luigi Caputi^{a,1}, Pier Luigi Buttigieg^{b,1}, Domenico D'Alelio^a, Federico Matias Ibarbalz^c, Matthew B. Sullivan^d, Samuel Chaffron^e, Chris Bowler^c, Maurizio Ribera d'Alcalá^{a,*}, Daniele Iudicone^{a,*}



Global Change Biology

Global Change Biology (2016) 22, 61–75, doi: 10.1111/gcb.12983

INVITED REVIEW

Bridging the gap between omics and earth system science to better understand how environmental change impacts marine microbes

THOMAS MOCK¹, STUART J. DAINES², RICHARD GEIDER³, SINEAD COLLINS⁴, METODI METODIEV³, ANDREW J. MILLAR⁵, VINCENT MOULTON⁶ and TIMOTHY M. LENTON²

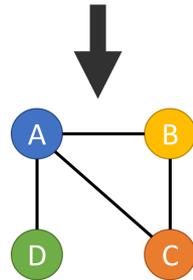
- Approche gène-centrée s'applique bien aux procaryotes (définis par leur métabolisme), comment l'appliquer aux eucaryotes ?
- Comment appréhender et prendre en compte la « dark genomic matter » ?

Approche fonctionnelle et modélisation

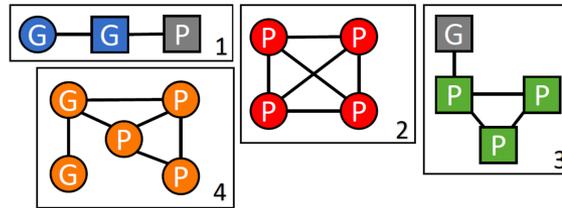
Similarité de séquences



Réseaux de similarité de séquences



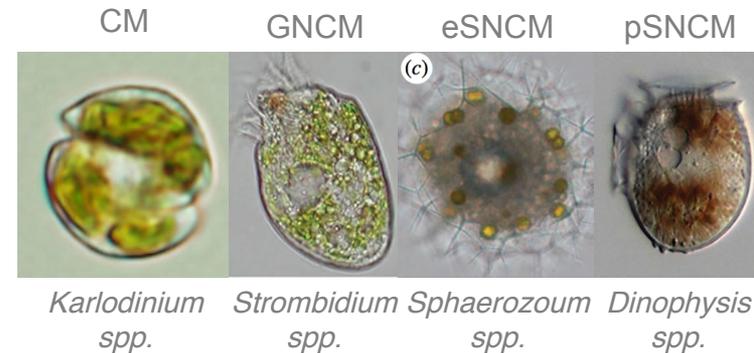
Composantes connexes



Annotation possible de certains traits fonctionnels !

L'exemple de la mixotrophie

4 types de mixotrophes



Tous ubiquistes !

Faure et al. 2019 ISME-J

Travail en cours (thèse d'Emile Faure) :
Analyse de données MétaG pour identifier des gènes marqueurs de la mixotrophie

Merci !

50 ans 2019



sakina@obs-vlfr.fr