

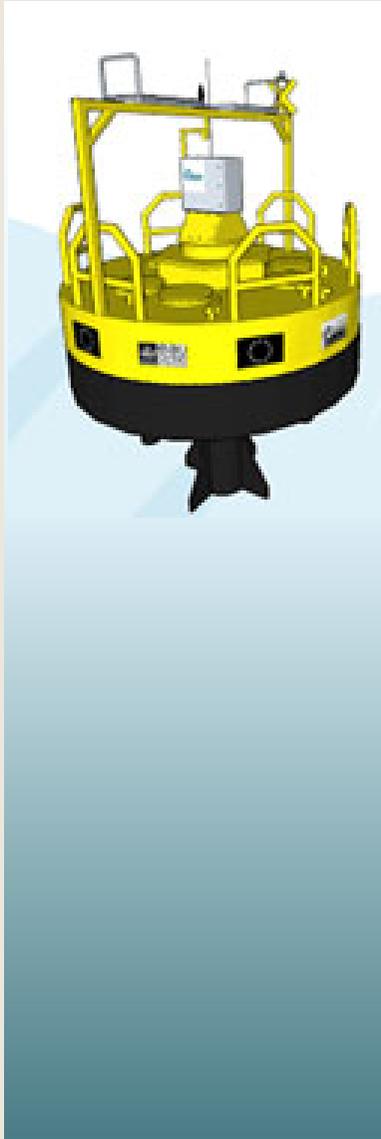
*EUTROPHISATION ET DÉSÉQUILIBRES
STœCHIOMÉTRIQUES LE LONG DU CONTINUUM
ESTUAIRE – BAIE DE SEINE : IMPACT SUR LA
PRODUCTION PRIMAIRE*

Pascal CLAQUIN (Université de Caen)
Léon Serre-Fredj, Maxime Navon, Oriane Jolly, Léo Chasselin,
Maël Deloor, David Lemeille, Franck Jacqueline et al.

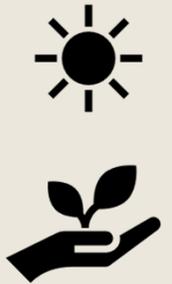


Projets en Baie et Estuaire de Seine

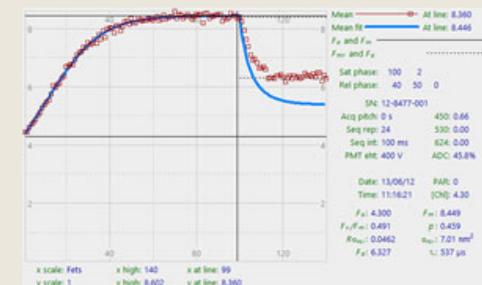


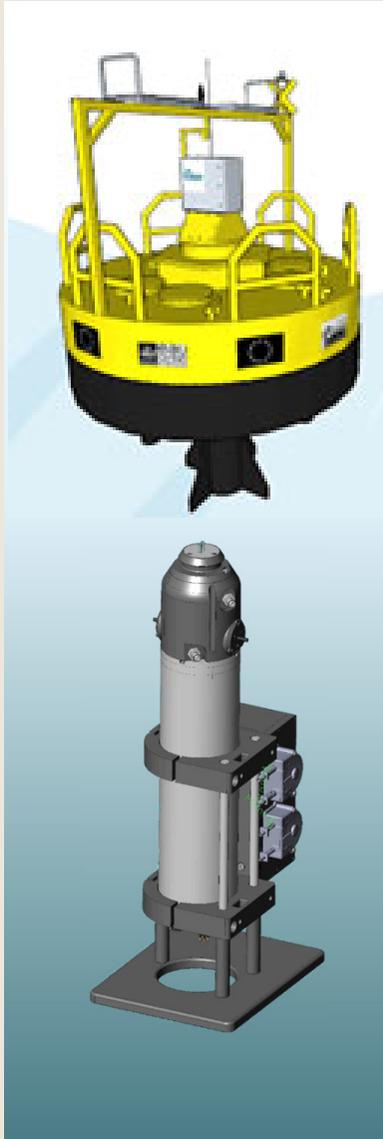


Estimation de la production primaire du phytoplancton

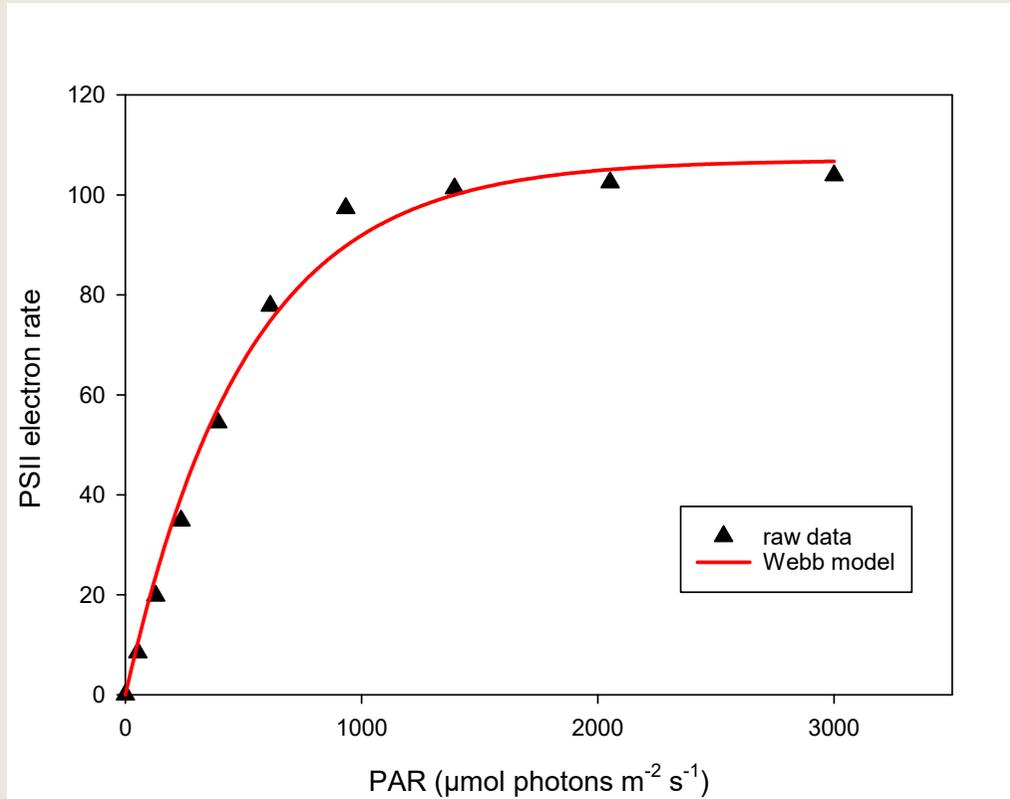


Fast Repetition Rate Fluorometer (FRRF) Act2 Chelsea Technology, UK
LABSTAF (Chelsea Technology)

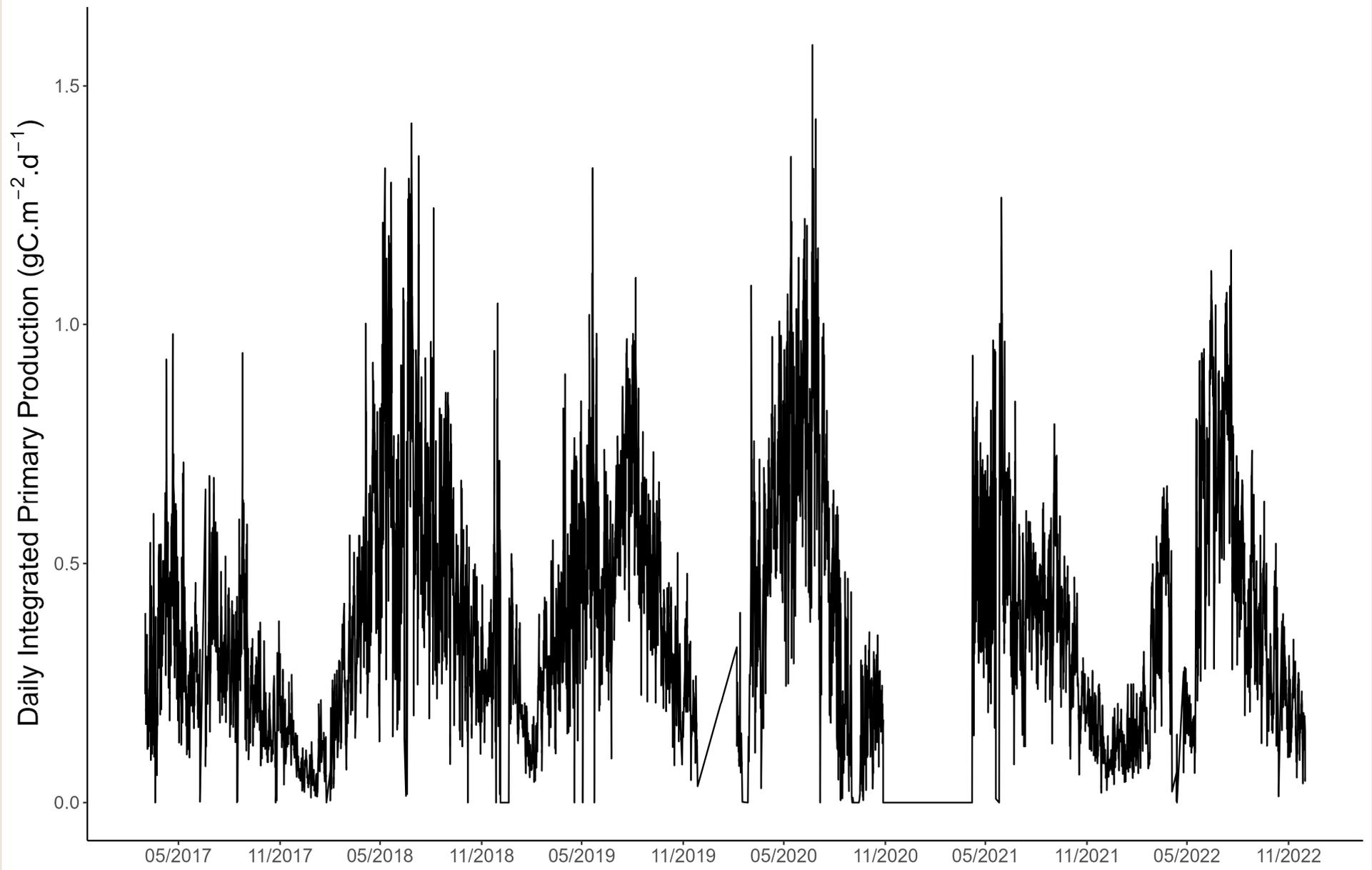


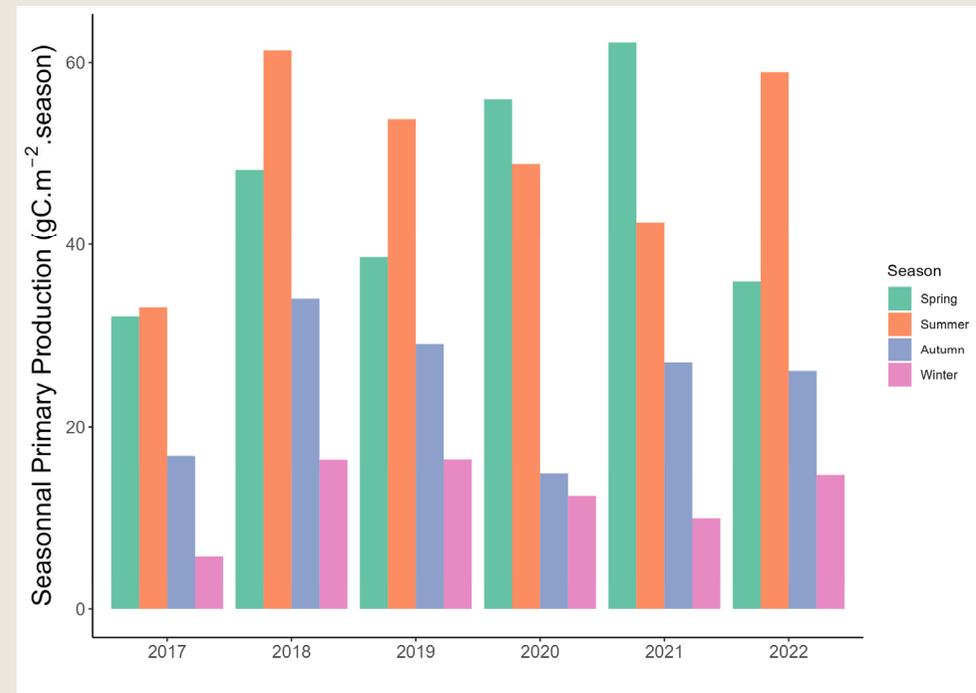
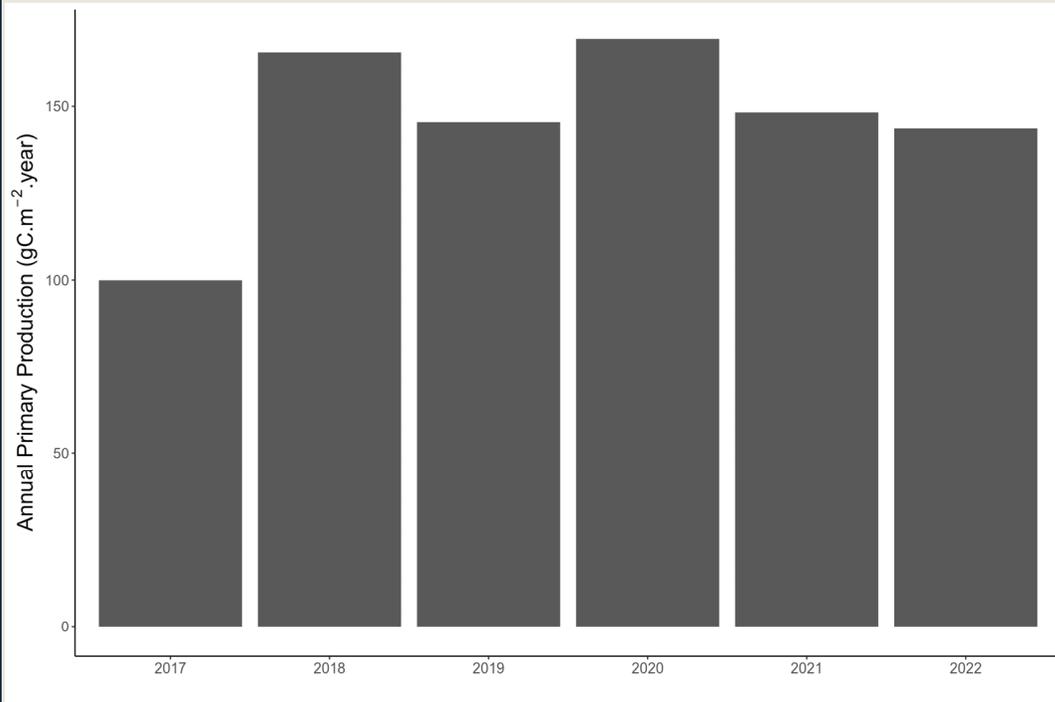


Mesures de photosynthèse Production/ Energie



Production d'électron en fonction de la lumière



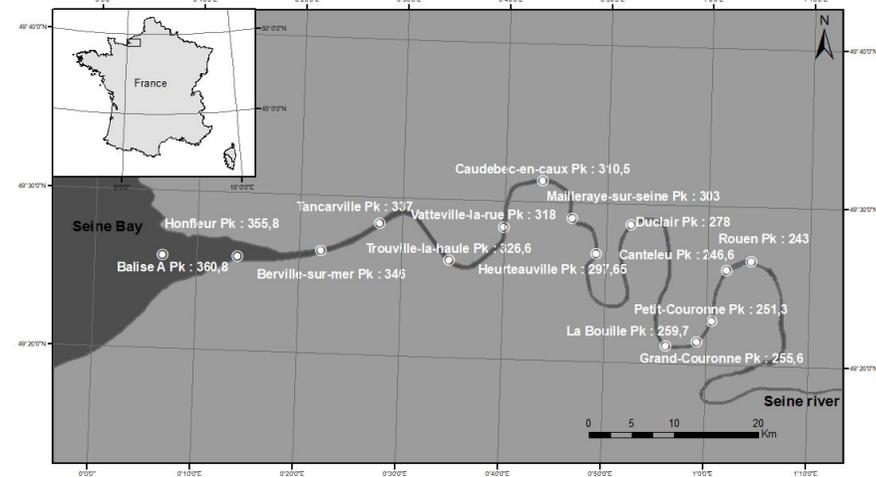


Production primaire estimée à partir des mesures FRRF de la bouée SMILE
 Claquin, Navon et al (un jour publié..)

Léon Serre-Fredj, Léo Chasselin, Orianne Jolly & Pascal Claquin (Frontiers 2023)

SARTRE - remontées « production primaire »

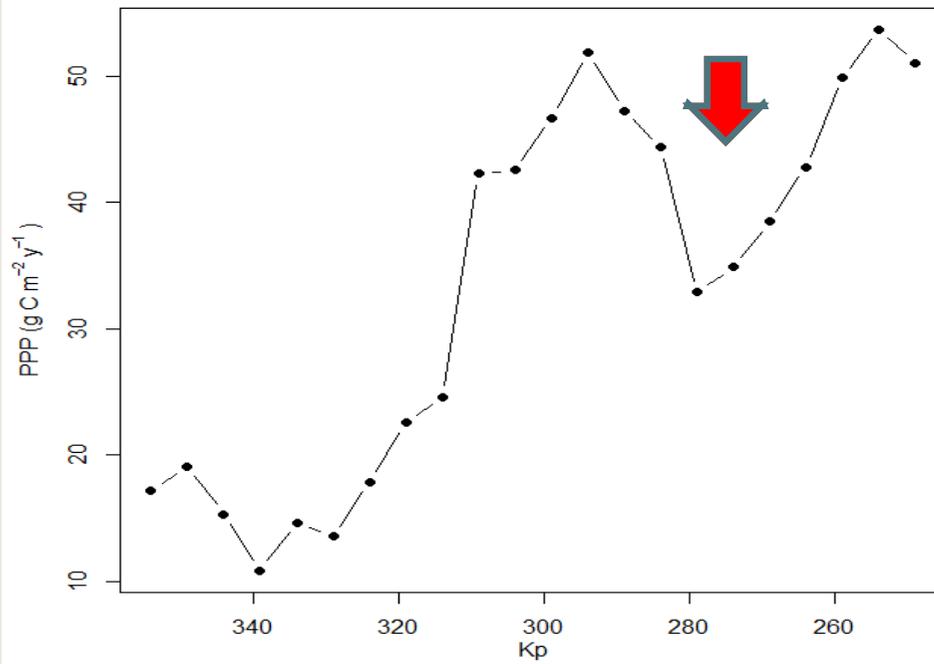
2019 à 2022



Production primaire / Etat physio
Diversité spectrale
Sels nutritifs, OPUS
O₂ et respiration
T, S, NTU
Chla
Lumière

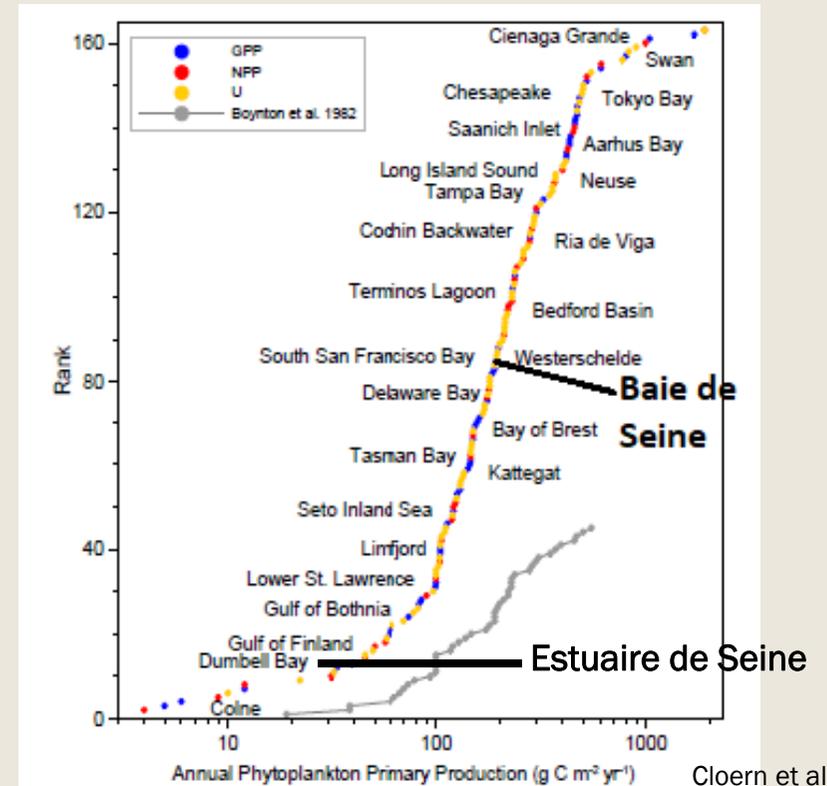
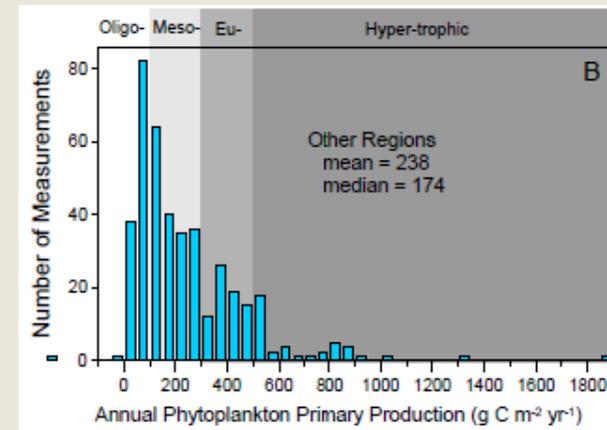
SITE	PK
Honfleur	355.8
Berville-sur-mère	346
Tancarville	337
Trouville-la-haute	326.6
Vatteville-la-rue	318
Caudebec-en-caux	310.5
Mailleraye-sur-seine	303
Heurteauville	297.65
Duclair	278
La Bouille	259.7
Grand-Couronne	255.6
Petit-Couronne	251.3
Canteleu	246.6

Production primaire annuelle le long de l'estuaire en gC m⁻² an⁻¹

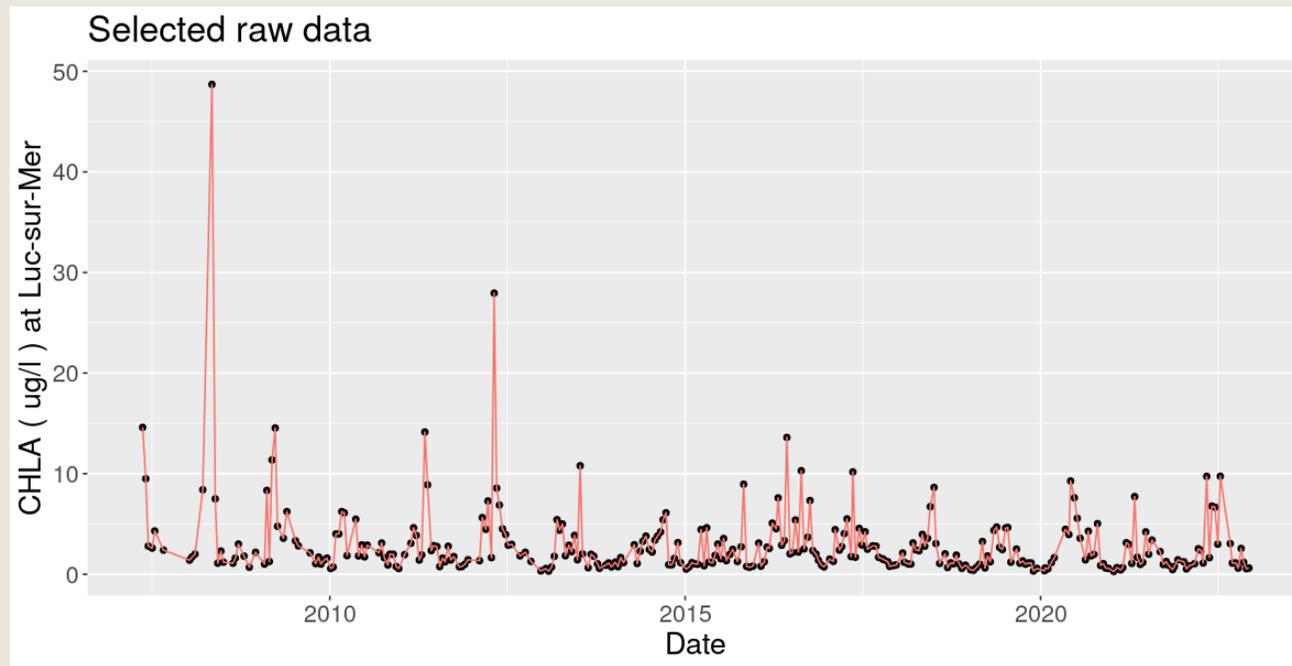


$$PPP = \int_0^{735 \text{ days}} \int_{z=0}^{Z_{eu}} \int_{Kp=246}^{Kp=355} J_{VII}(E_z, t, z, s) / \Phi_{e,c} dt dz ds$$

33 g C.m⁻².an⁻¹

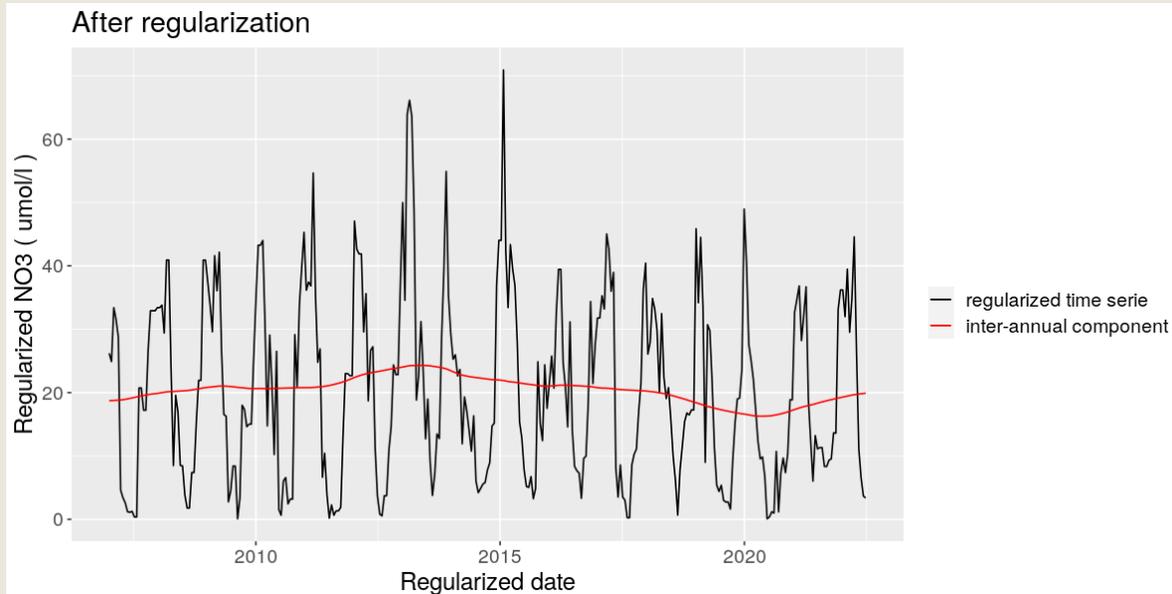


SOMLIT – Luc sur Mer Chla



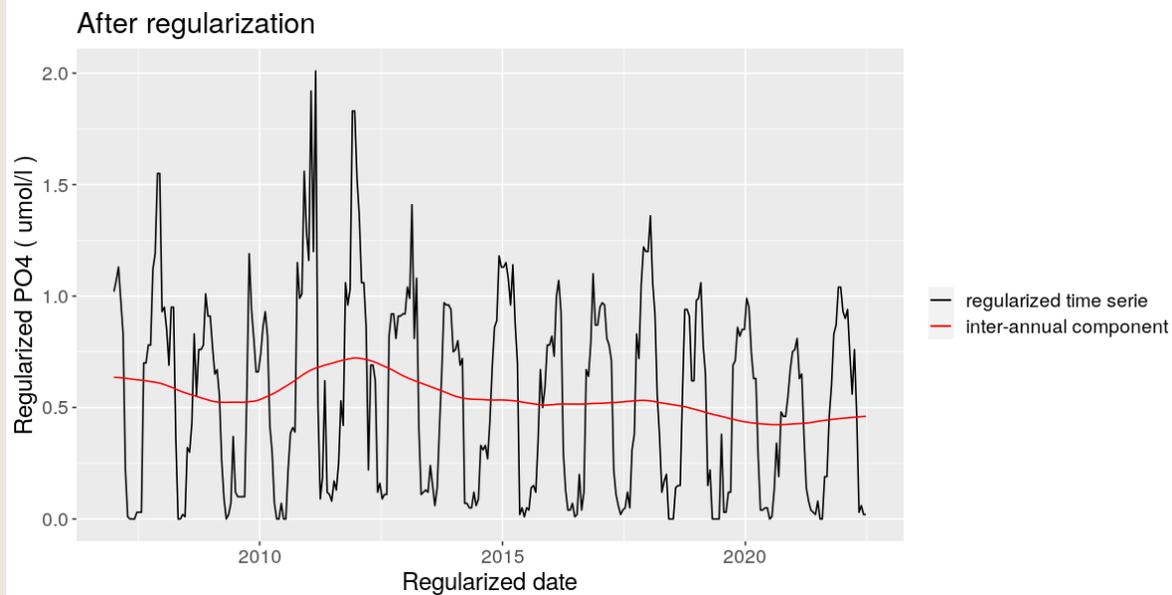
MySOMLIT Tendence significative a la décroissance. --> test de Mann-Kendall: tau=-0.47 (score: ***).

Tendance modélisée par la droite : R²=0.45, slope=-0.14, variation=-2.12 units ==> -52.4%



NO₃

Pas de tendance significative. -
-> test de Mann-Kendall: tau=-
0.255 (score: ***).



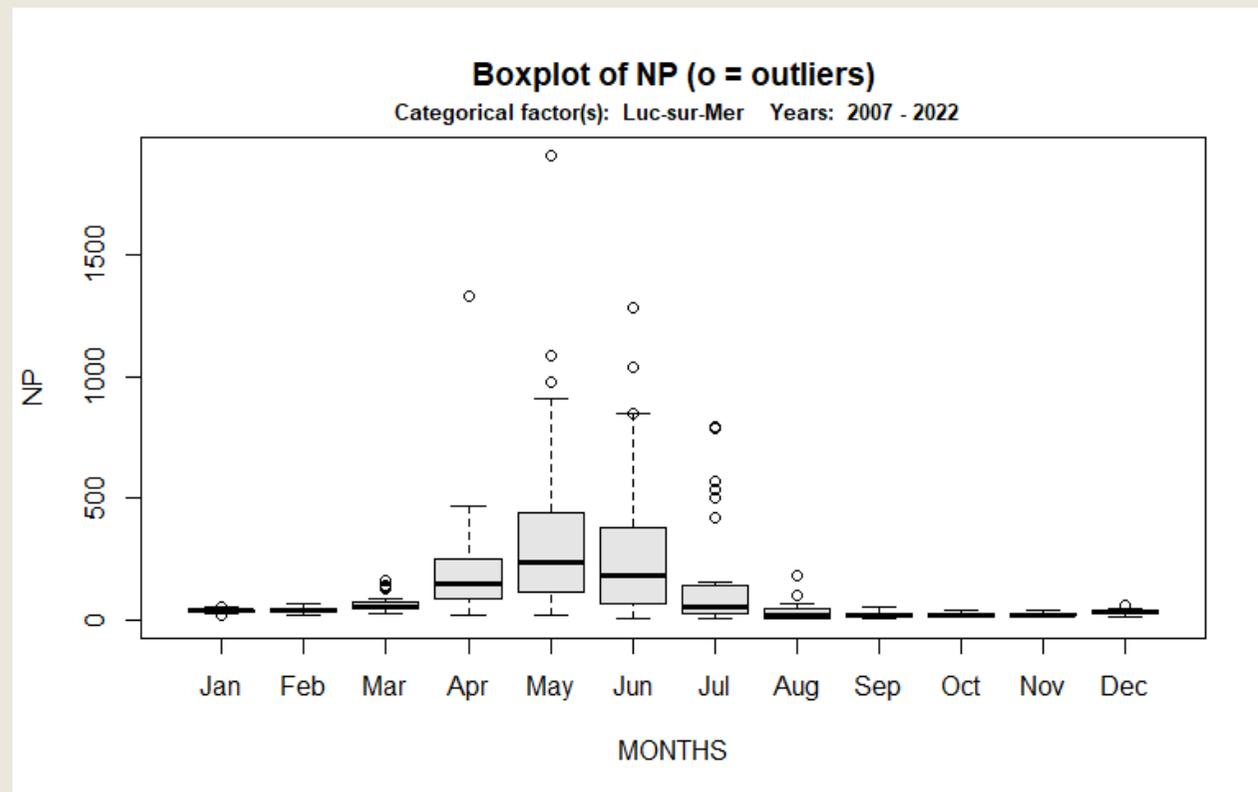
PO₄

Tendance significative a la
décroissance. --> test de Mann-Kendall:
tau=-0.617 (score: ***).

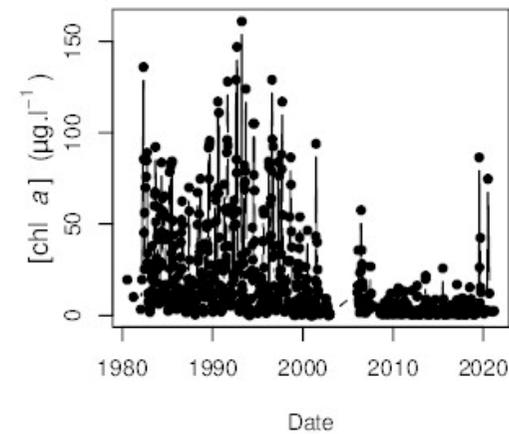
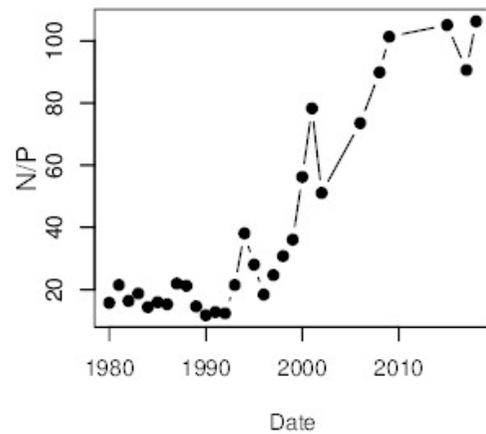
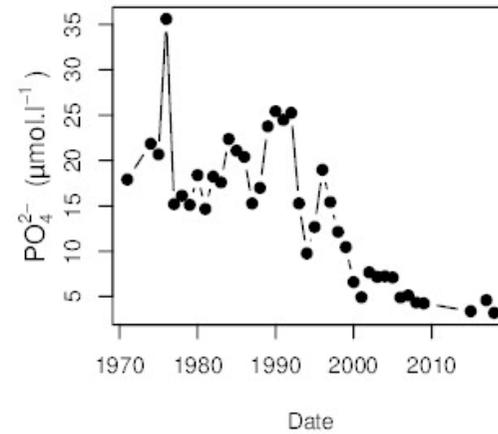
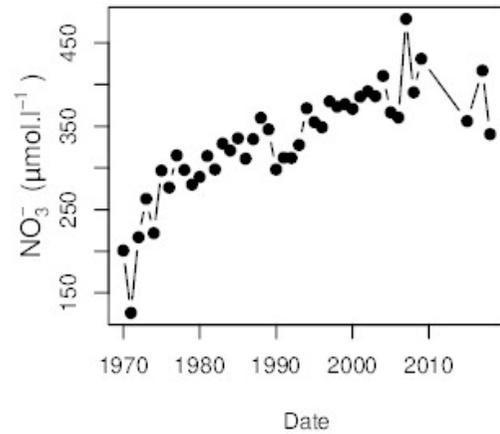
Tendance modélisée par la droite :
R2=0.54, slope=-0.01, variation=-0.2
units ==> -31.3%

■ SOMLIT Luc-sur-Mer

- Depuis 2007
- N:P : moyenne = 1196
- Médiane : 38.9
- Min : 1.6 – Max : « 1906 »
- 87% des données N:P > 16



Estuaire de Seine

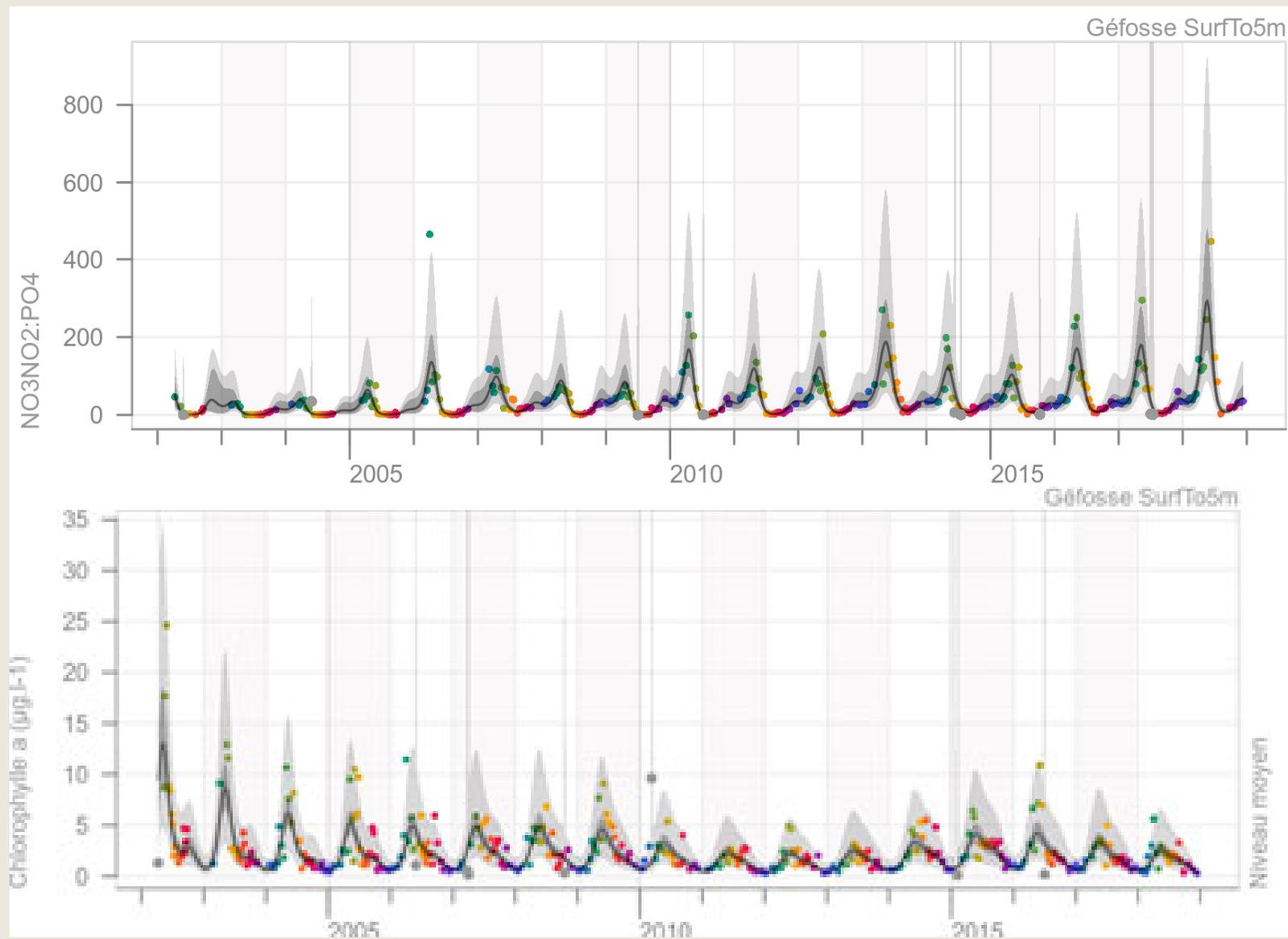


Historical variations in the Seine estuary measured at Duclair (Kp: 278): Nitrates ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), Phosphates ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), N/P ratio, chl a concentration ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

Baie de Veys

N/P

Ifremer -
LERN

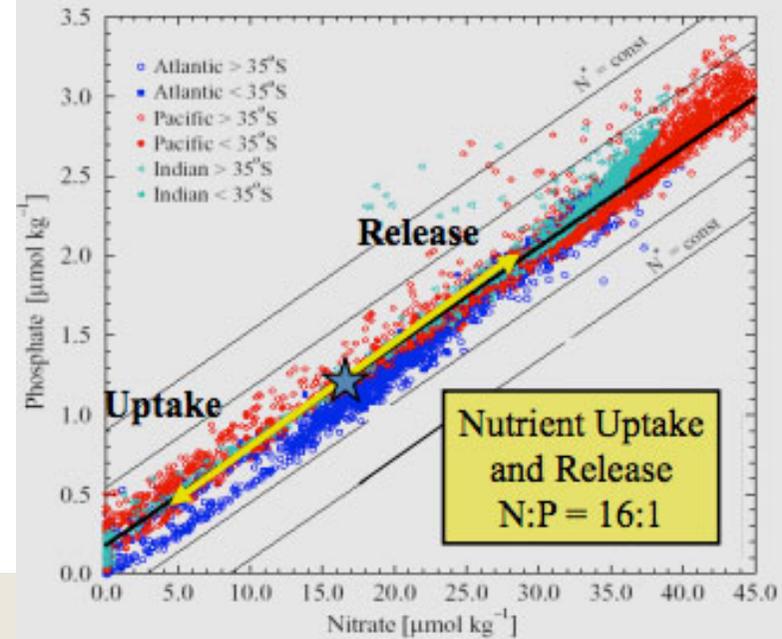


Rapports de Redfield = Equilibre général entre les éléments dans l'océan



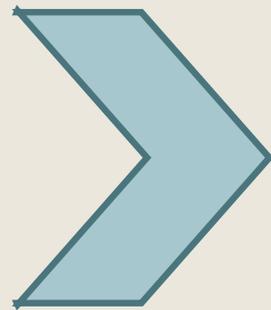
The work done by Alfred Redfield (left) paved the way for our understanding of how the runoff of nitrogen and phosphorus from fertilized lands fuels phytoplankton blooms like those near the mouth of the Mississippi River (right). Left photo courtesy of the Woods Hole Oceanographic Institution Archives; right photo © NASA/Landsat/Phil Degginger/Alamy.

C : **N** : **P**
106 : **16** : **1**



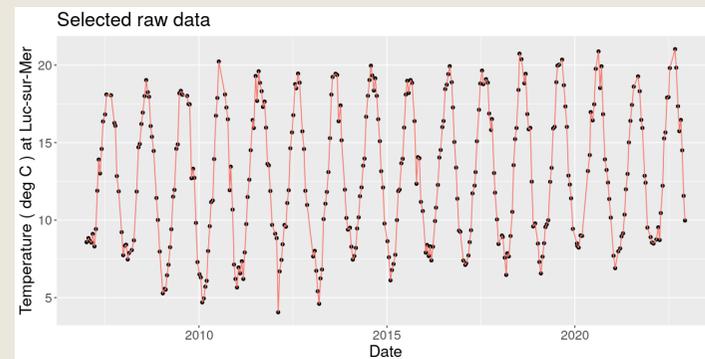
Equilibre des cycles biogéochimiques

Dans le contexte d'augmentation de la température des eaux , quelles conséquences de ce déséquilibre sur le compartiment phytoplanctonique?



Projet DYSTRO-B

Moyenne : + 0,08°C / an



Projet DISTROB



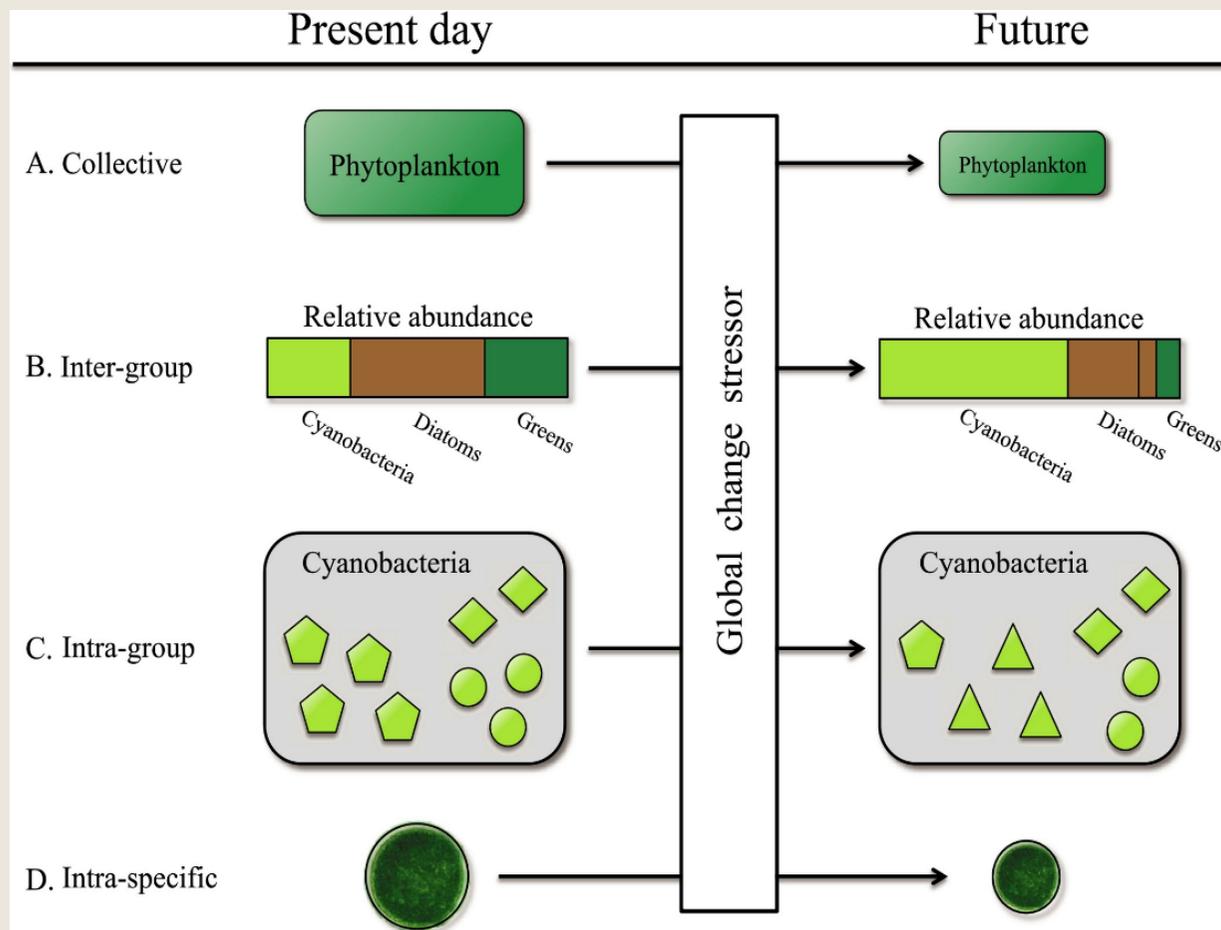
- Pascal Claquin(Université de Caen) – Tania Hernández- Fariñas (Ifremer)
- Thèse Lise Delatte – Nov. 2023
- L'équipe SOMLIT (Oriane Jolly, Léo Chasselin, David Lemeille)
- Clara Massinot, Fabienne Marais
- L'équipe du LERN Ifremer de Port en Bessin



Dans le contexte d'augmentation de la température des eaux , quelles conséquences de ce déséquilibre sur le compartiment phytoplanctonique?

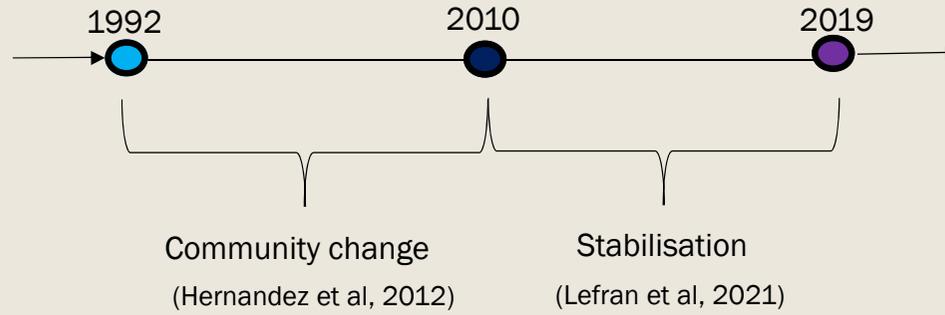
- Sur la structure et la composition des communautés phytoplanctoniques (diversité spécifique, fonctionnelle, structure en taille, etc.)
- Les conséquences sur la production primaire pélagique et les flux de carbone associés
- Approche multi-échelles

Contexte de l'étude

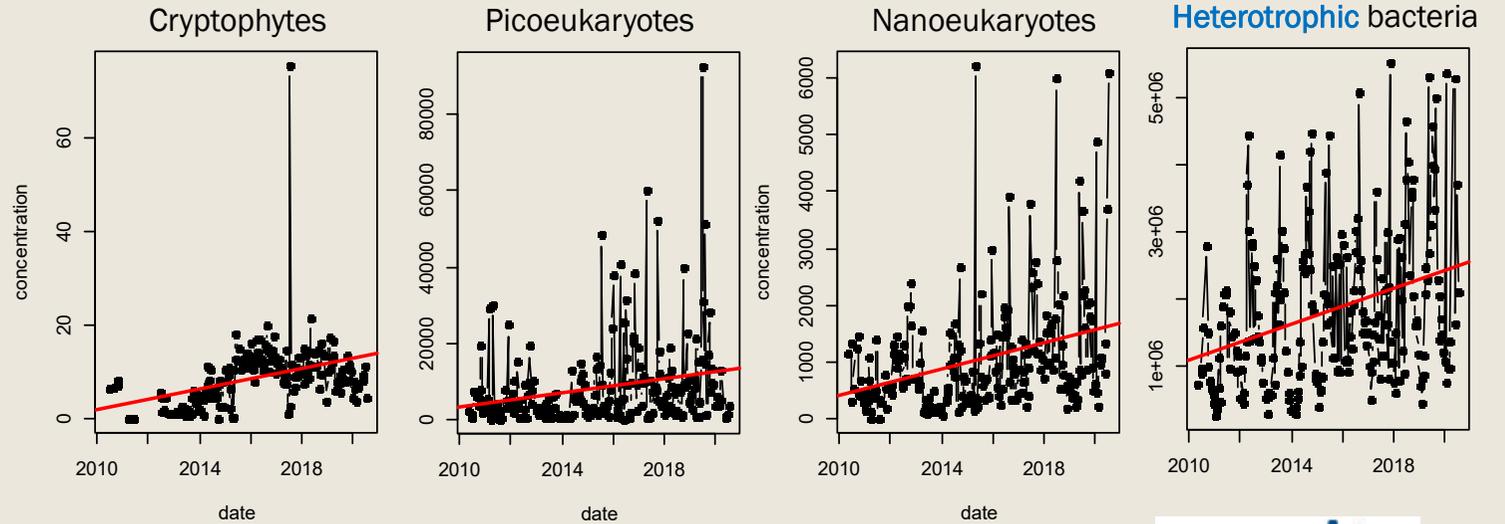


Prédiction de l'évolution de la structure des communautés phytoplanctoniques à l'échelle globale (biomasse, diversité, classes de taille) (d'après Litchman et al 2015)

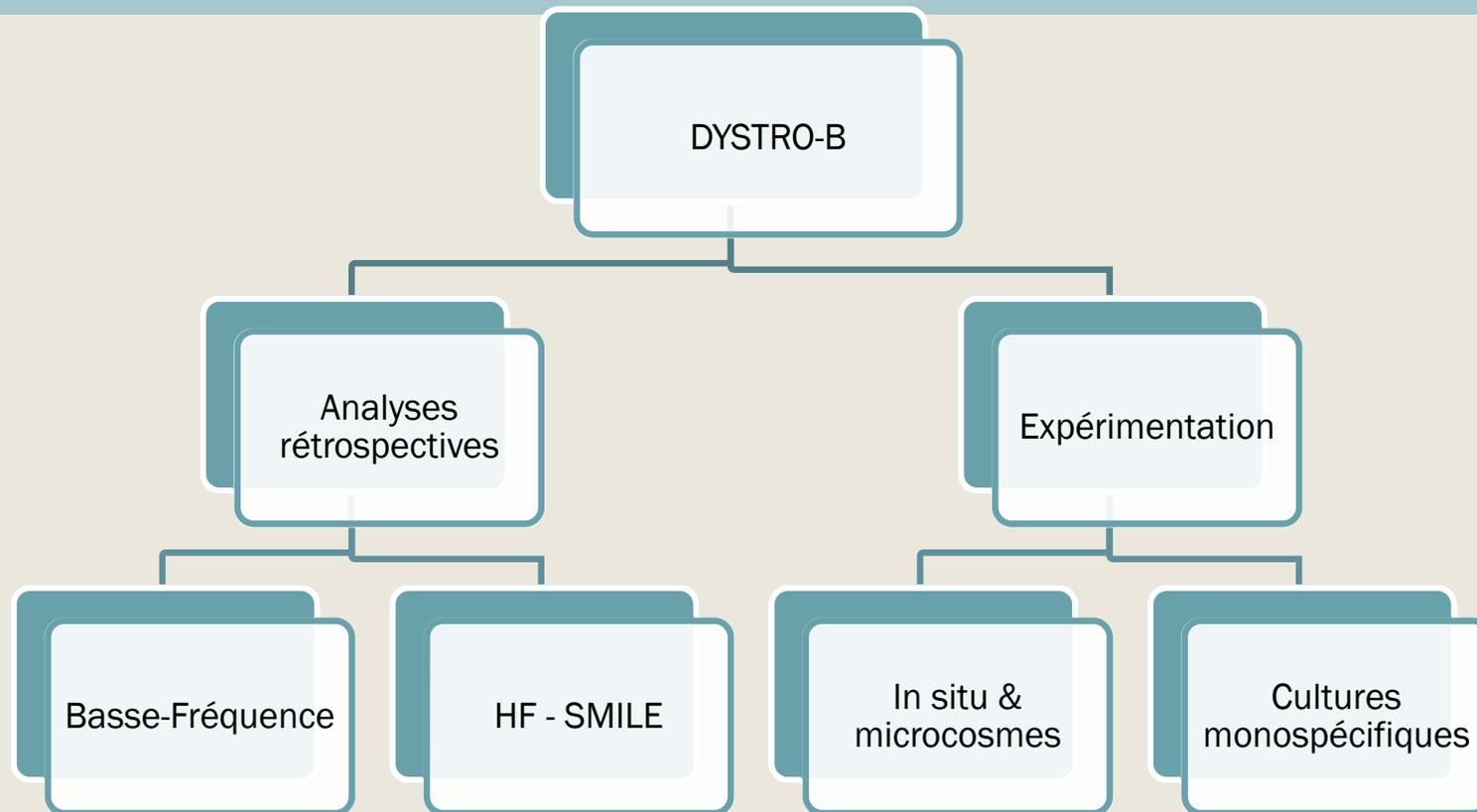
Microphytoplankton :



Pico-nano phytoplankton



Actions dans DYSTRO-B



Analyses rétrospectives

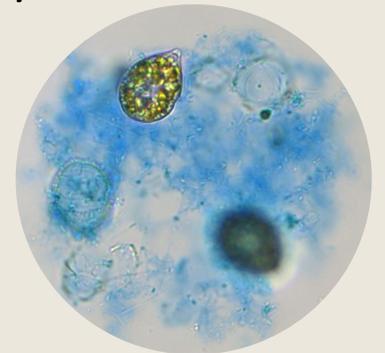
- Une analyse rétrospective de séries d'observations de la baie de Seine (RHLN, SNO SOMLIT, PHYTOBS et COAST-HF) (modèles linéaires généralisés (GLM))

Expérimentation

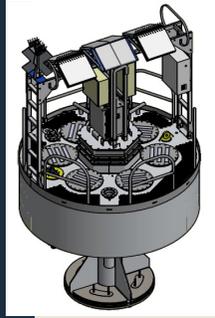
In situ &
microcosmes

Chambre thermostatée
Cycle lumière en fonction
de la saison.

- Echantillonnages : gradient d'eutrophisation Est-Ouest (large de Cabourg, large de Luc-sur-Mer (SMILE) et au large de Port en Bessin / mars 2024-sept 2025
- Incubation en microcosmes (Ratios N/P(Si))
 - 4 Jours (Serre et al 2022)
 - Communautés (Cytométrie + Flores partielles)
 - Paramètres photosynthétiques
 - TEP, EPS (excrétions de carbone)
 - Pools C,N,P
 - Pigments (Ifremer)
 - pH , O₂



Serre et al 2021 ; Serre et al 2022



Filtrated (100µm)
water

+

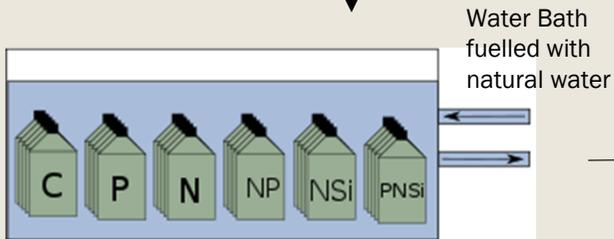


C P N NP NSi PNSi

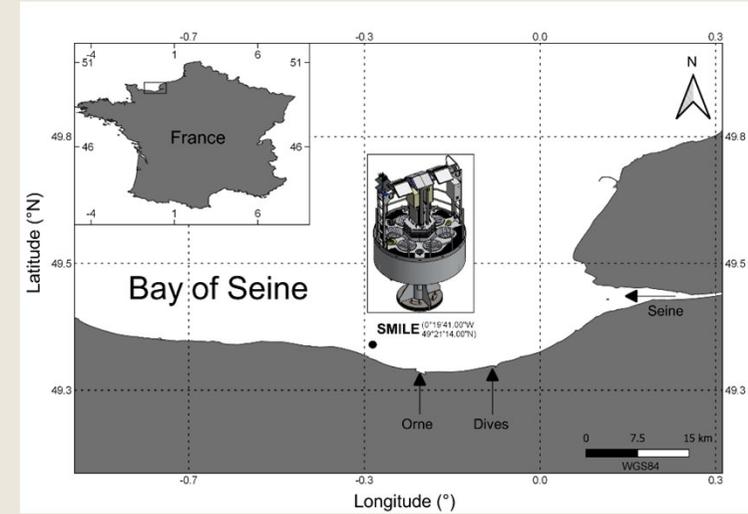
Enrichment



4-5 days

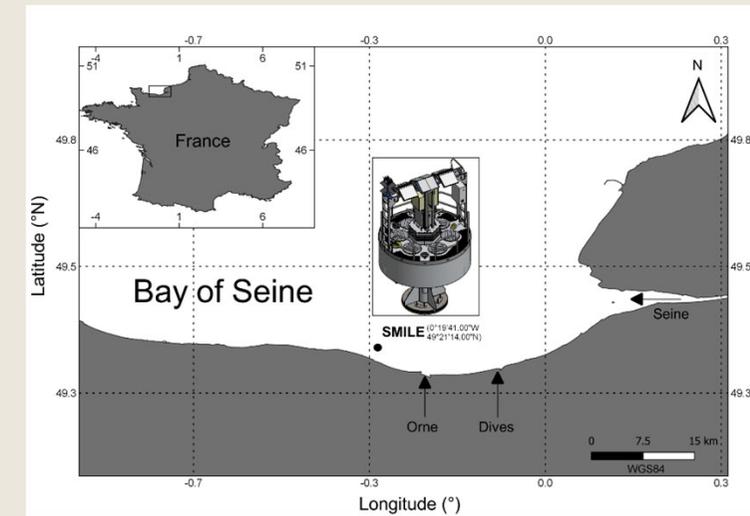
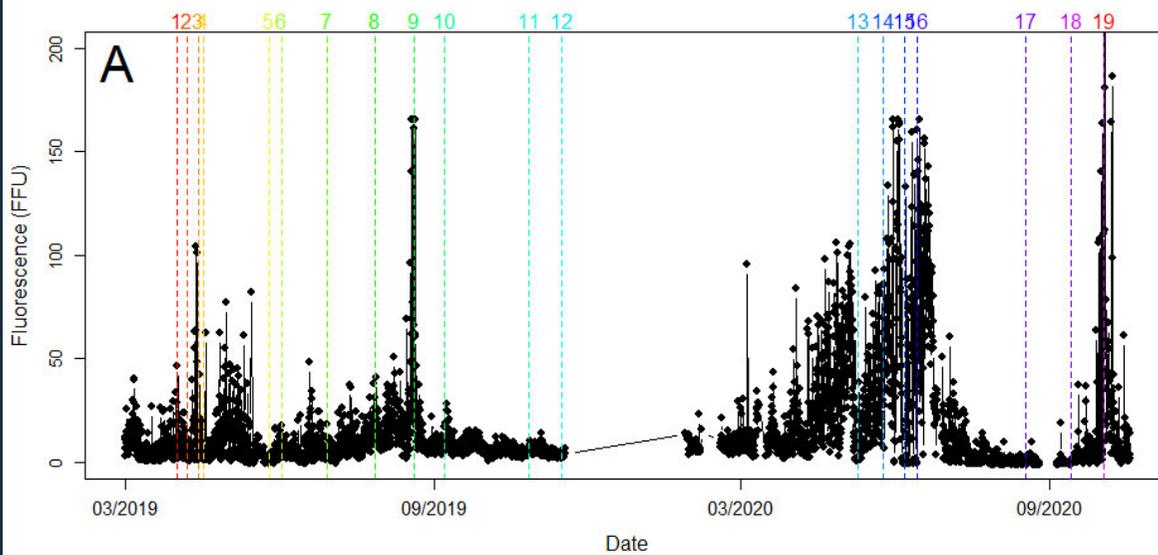


day 4
measurement



Répétition des incubations 19 fois en 2 ans

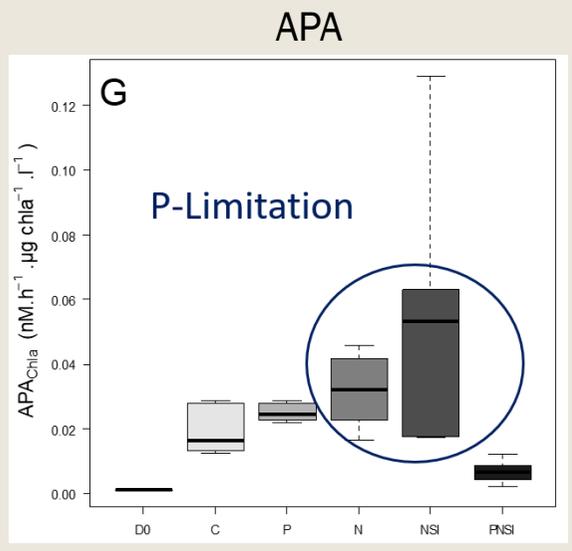
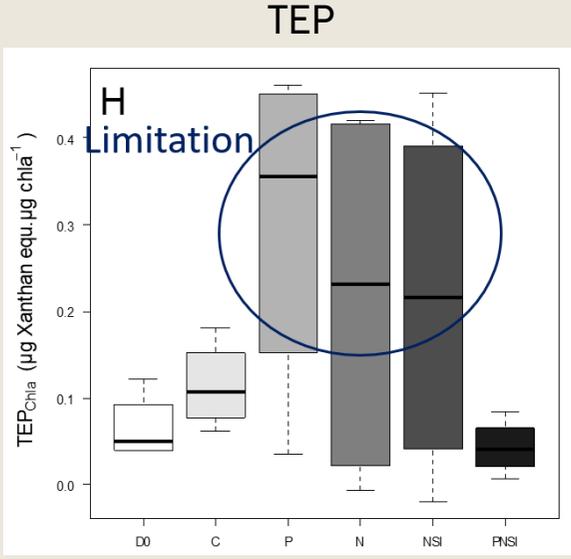
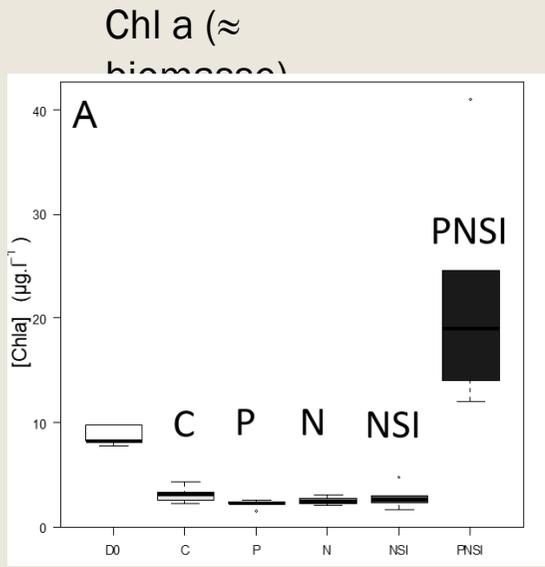
- « Pulse » type enrichment simulation
- Evaluer les effets des enrichissements sur la composition des communautés phytoplanctoniques
- Mesures : Biomasse, nutriments, APA, TEP, paramètres photosynthétiques.



Serre et al 2021 ; Serre et al 2022

Ex incubation lors d'un bloom de *Lepidodinium chlorophorum*

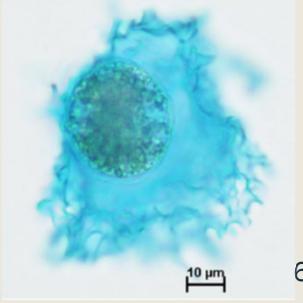
Parameters physiologique



► Besoin de N & P pour croître -> **colimitation NP**

► Indicateurs de stress physiologiques

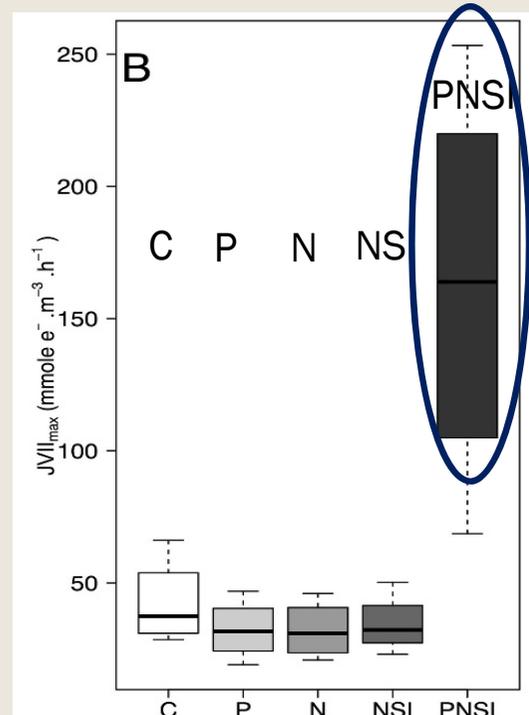
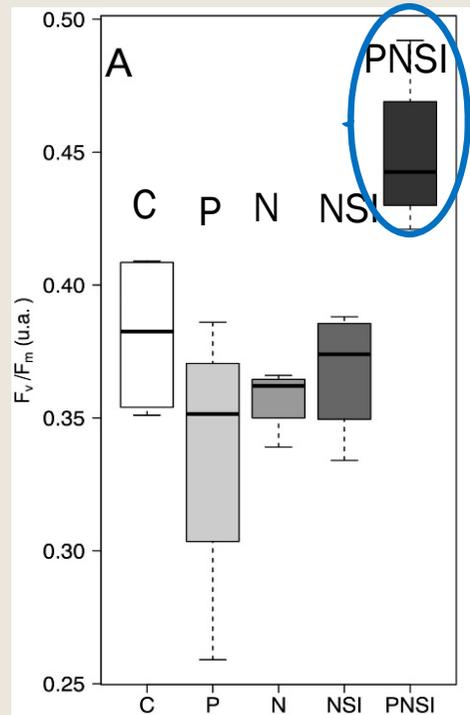
Serre-Fredj et al 2021



Meilleur état
physiologique



Meilleur production



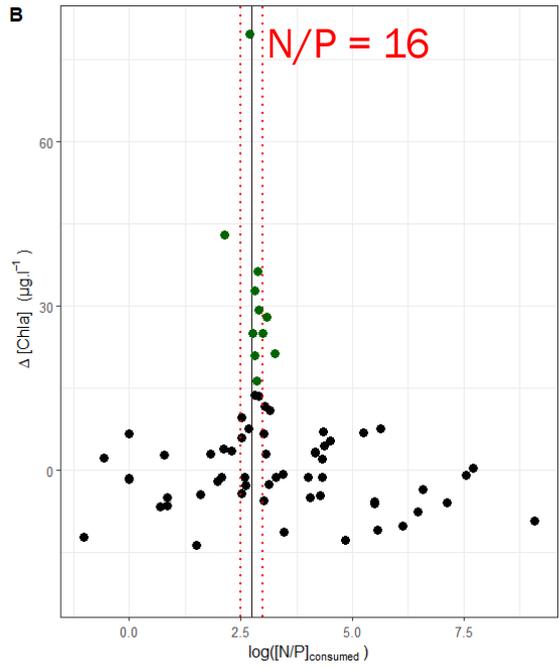
Il y a co-limitation
lorsque l'absorption
des ressources et
l'incorporation d'un
élément dépendent
d'un autre élément

Serre-Fredj et al 2021

- Meilleure capacité photosynthétique pour le "Full enrichment" (PNSI)

Production & Limitation : 19 incubations

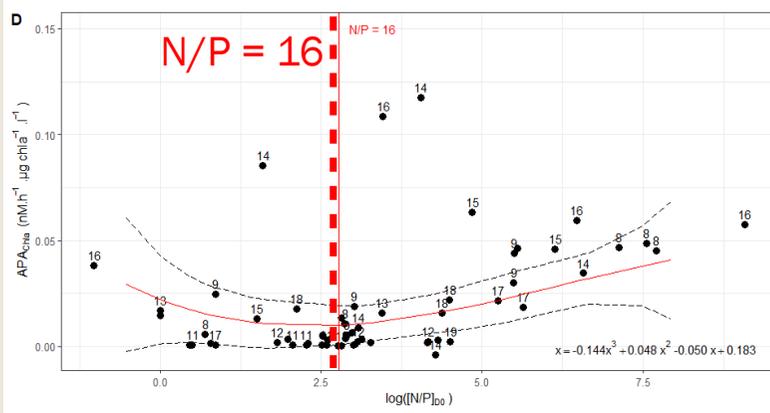
Biomass



N limitation ← → P limitation

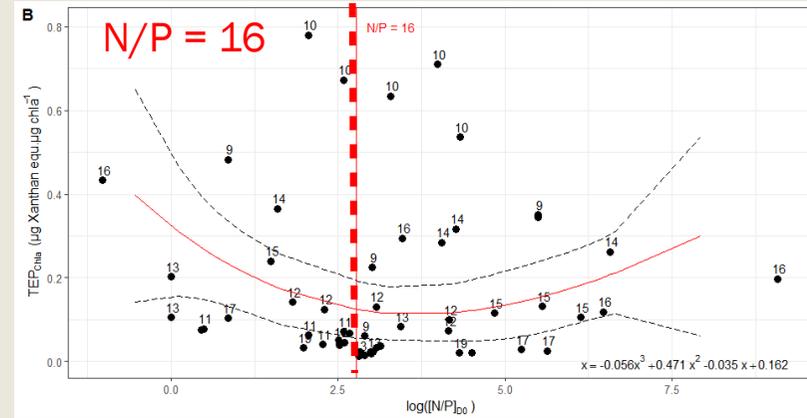
- **N/P = 16** : Higher biomass

APA



- **N/P = 16** : Minimal APA

TEP



- **N/P = 16** : Minimal TEP

Indicateurs de limitation

N/P = 16 : optimal pour la croissance du phytoplancton

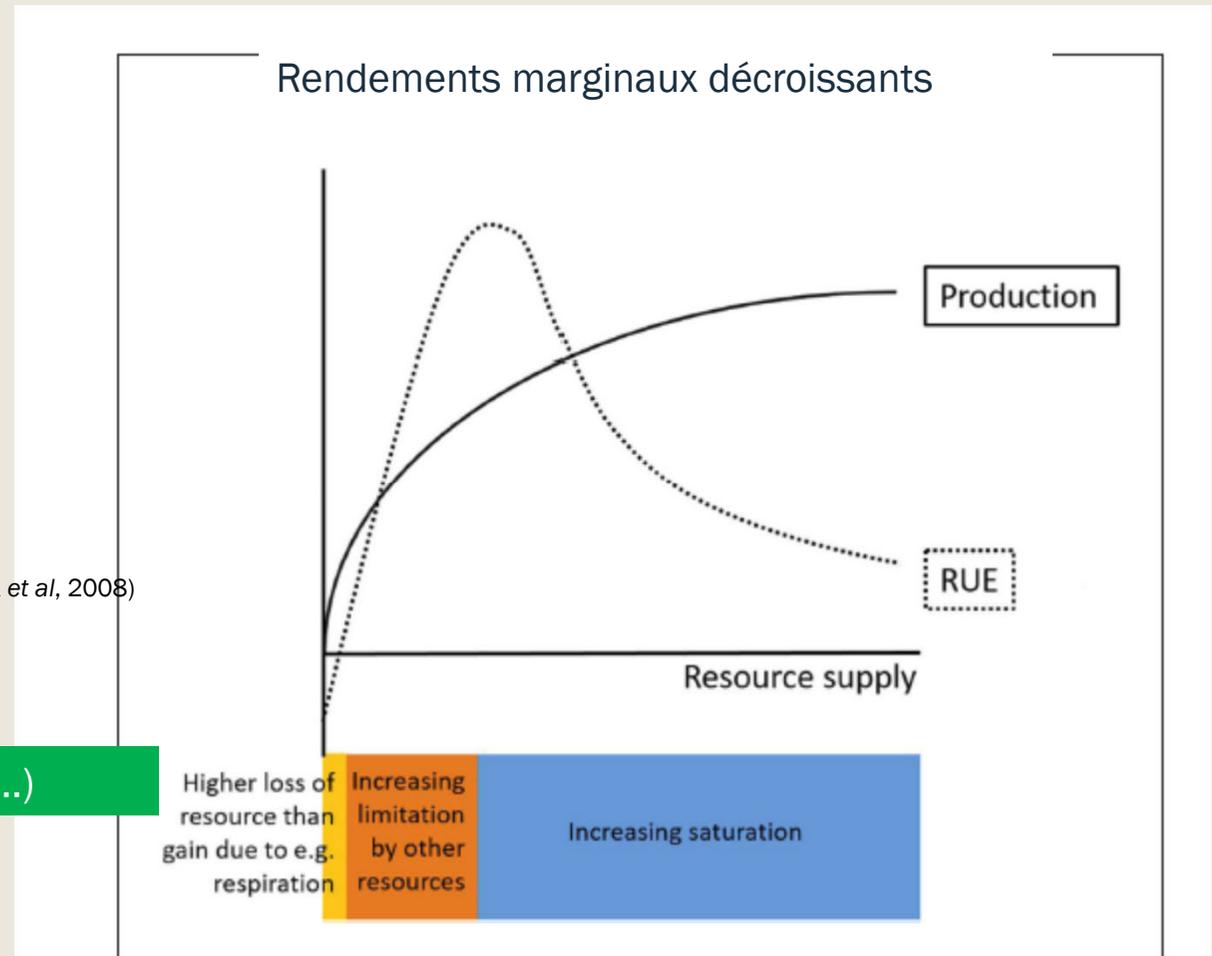
Ressource use efficiency : comment la ressource est transformée en biomasse (et / ou flux)

•
$$RUE = \frac{\text{Productivity rate}}{\text{Supply} \times \text{Uptake}}$$
 (Hodapp et al, 2016)

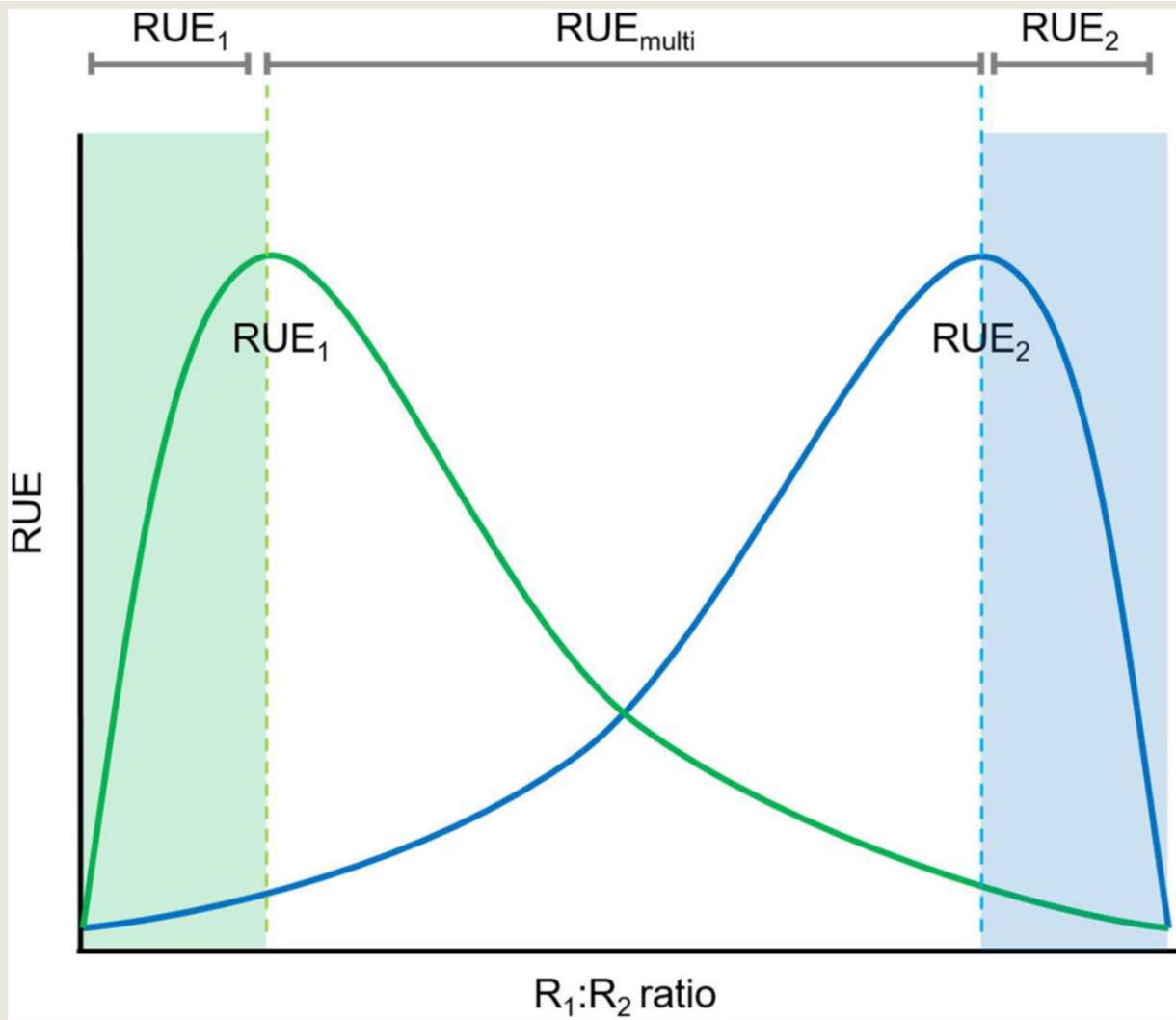


•
$$RUE_p = \frac{\text{Biomass}}{\text{Phosphorus input}} = \frac{\text{Chl } a}{\text{P}}$$
 (Ptacnik et al, 2008)

POUR UN FACTEUR LIMITANT (P, ou N ou Si ...)



Hodapp et al 2019



POUR PLUSIEURS FACTEURS LIMITANTS (P, ou N ou Si ...)

Hodapp et al 2019

Ressource use efficiency (RUE) : Appliqué pour les rapports N/P

- $$RUE = \frac{\text{Productivity rate}}{\text{Supply} \times \text{Uptake}}$$
(Hodapp et al, 2016)



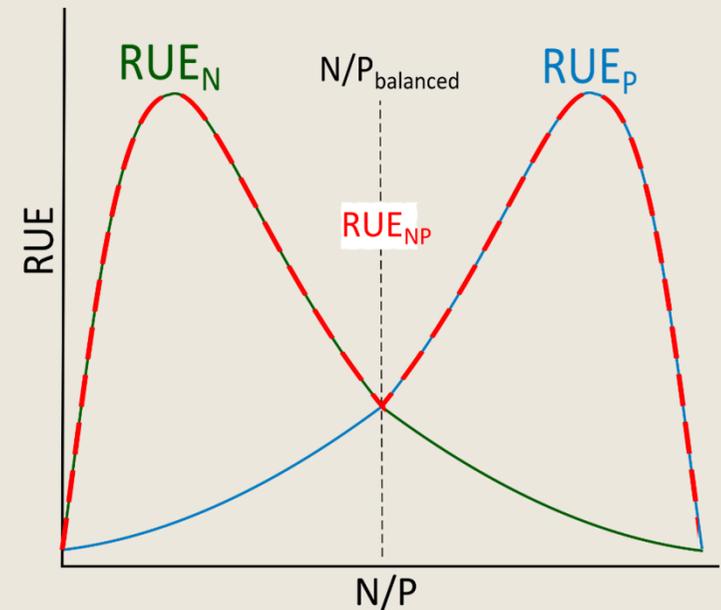
- $$RUE_p = \frac{\text{Biomass}}{\text{Phosphorus input}} = \frac{\text{Chl } a}{\text{P}}$$
(Ptacnik et al, 2008)

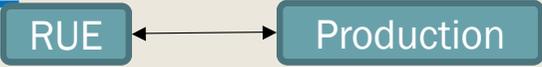


- $$RUE_{NP} = \frac{\text{Biomass}}{\text{Min(Phosphorus ; Nitrogen)}} = \frac{\text{Chl } a}{\text{Min(P ; N)}}$$
(Serre-Fredj et al, 2022)

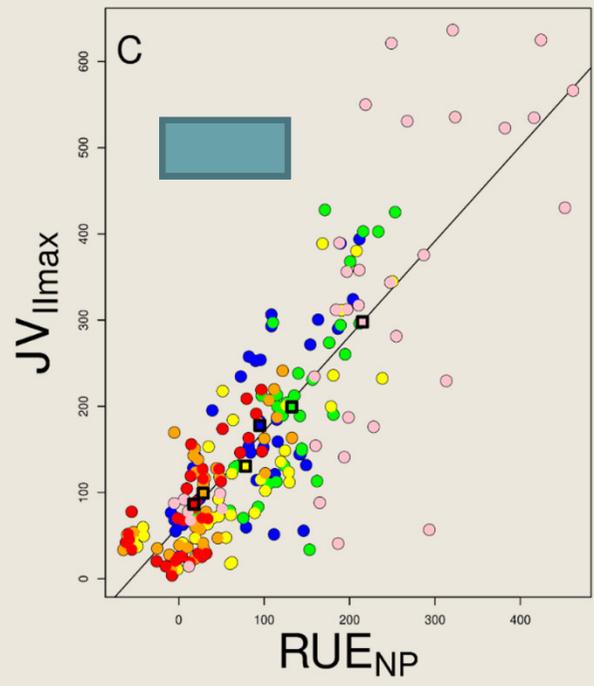
- Co-limited RUE calculation :

$$RUE_{NP} = \frac{chl\ a_{final}}{\min\left\{\frac{N}{N/P_{balanced\ ratio}}, P\right\}}$$

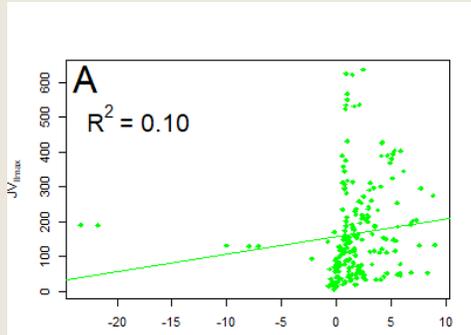




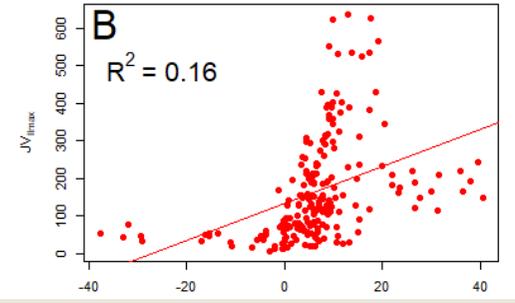
7 incubations
 Réalisées entre juin
 et septembre 2021
 N/P/Si



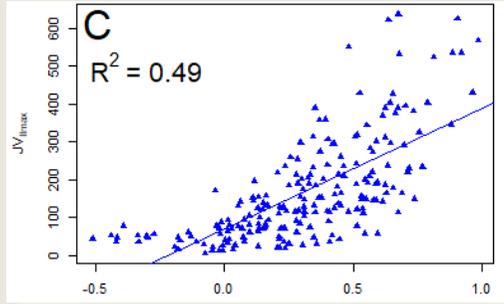
RUE Si



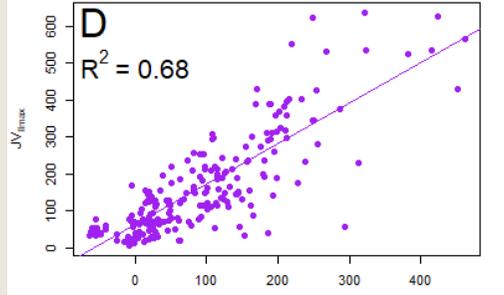
RUE P



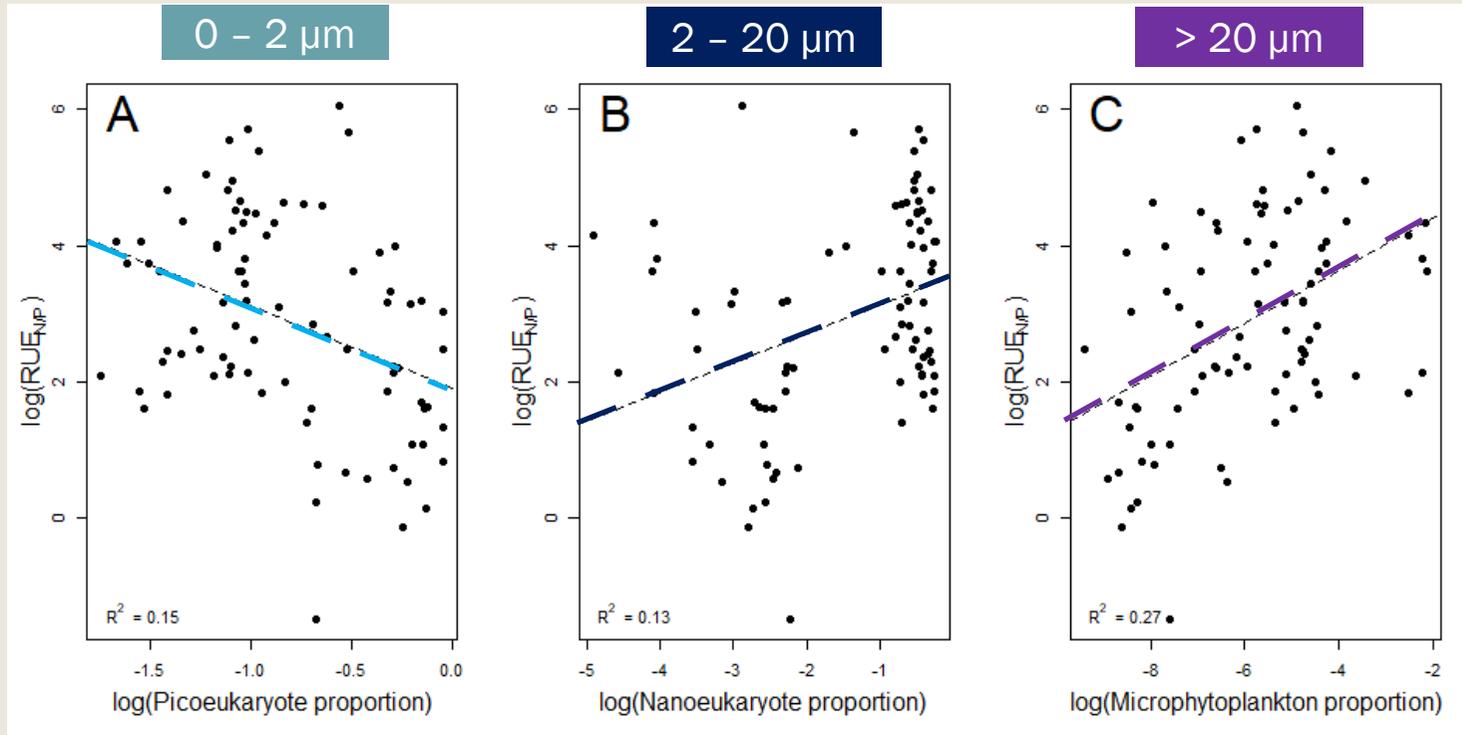
RUE N



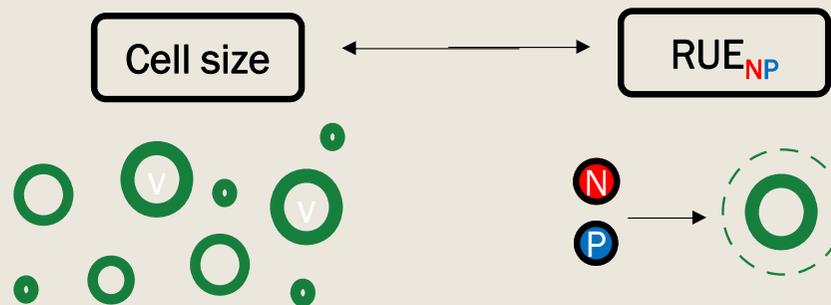
RUE NP



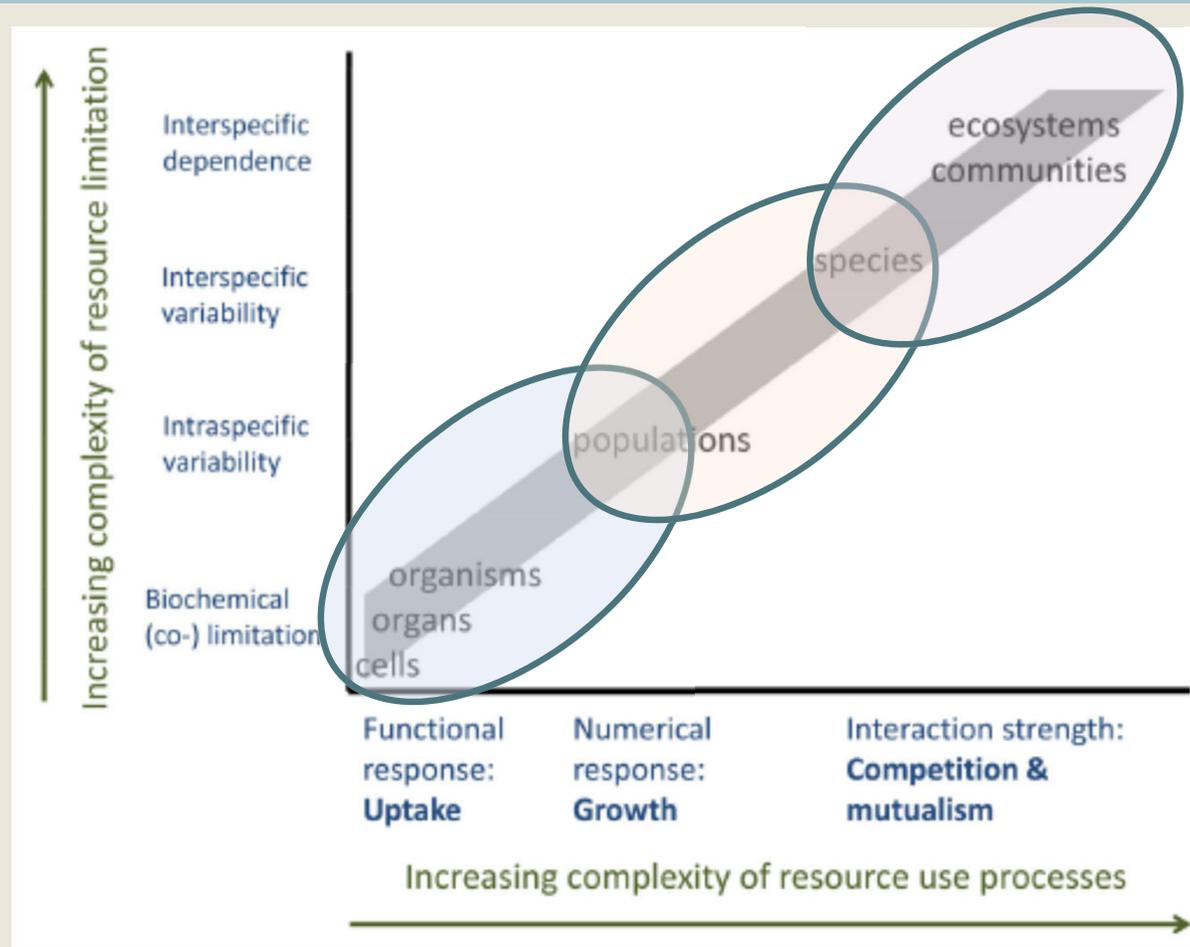
RUE & structure de taille:



Application aux
 19 incubations
 « pulses »



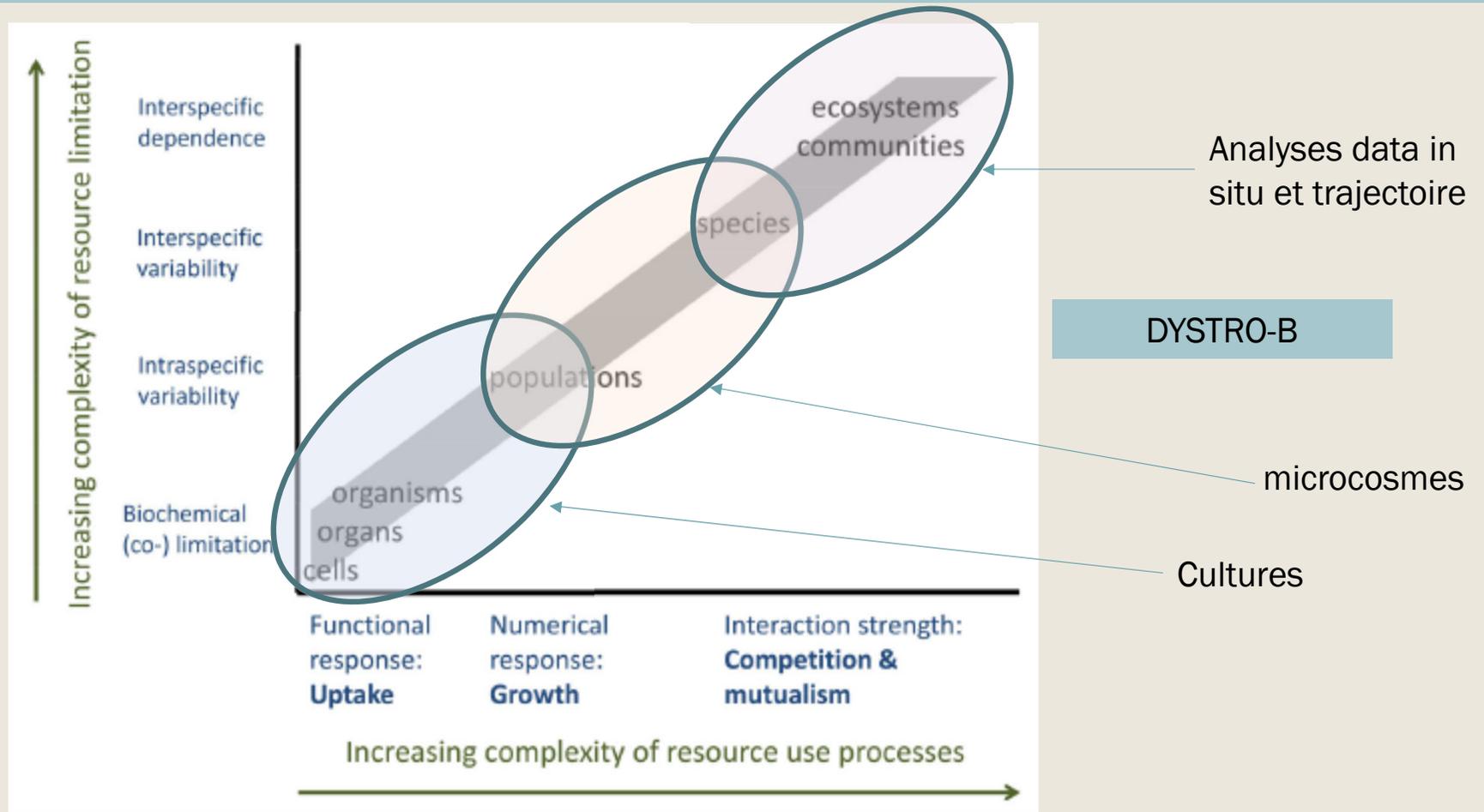
L'utilisation des ressources dépend du niveau d'organisation considérée



DYSTRO-B

La complexité croissante des processus d'utilisation des ressources et les types de limitation des ressources diminue la prévisibilité de la RUE

L'utilisation des ressources dépend du niveau d'organisation considérée



La complexité croissante des processus d'utilisation des ressources et les types de limitation des ressources diminue la prévisibilité de la RUE

Expérimentation

Cultures
monoclonales

Culture semi-continue
Chambre thermostatée
Cycle lumière en fonction
de la saison.

- *Diatomées, Dinoflagellés, Chrytophytes, Cyanobactéries*



1.8 m

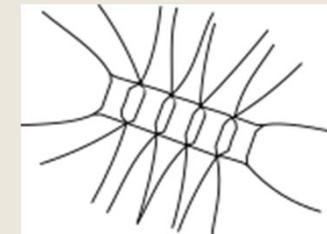


300 m



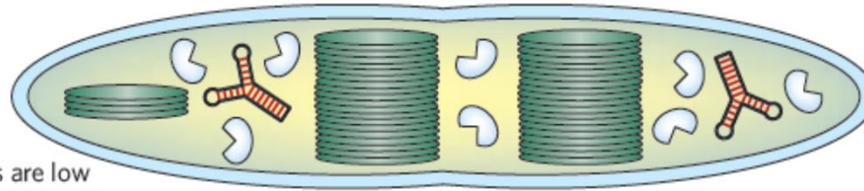
0.8 μm

130 μm



The 'survivalist'

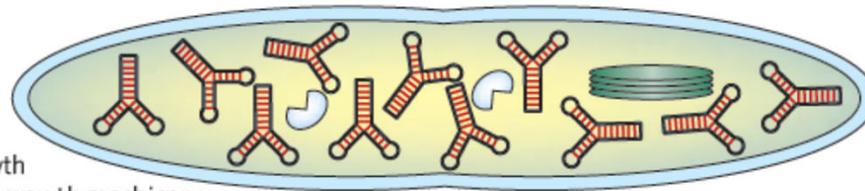
Has a high N:P ratio (>30)
Can sustain growth when resources are low
Contains copious resource-acquisition machinery



Survivalistes N:P > 30

The 'bloomer'

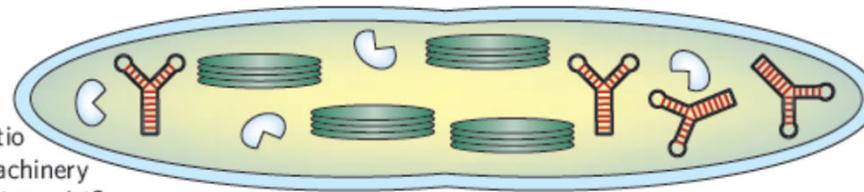
Has a low N:P ratio (<10)
Adapted for exponential growth
Contains a high proportion of growth machinery



Bloomers N:P < 10

The 'generalist'

Has a N:P ratio near the Redfield ratio
Balances growth and acquisition machinery
Do many species with these attributes exist?
Does the Redfield ratio mostly reflect a balance between survivalists and bloomers in a population?



Généralistes N:P ≈ 16

Growth machinery



Ribosomal RNA has a low N:P ratio

Resource-acquisition machinery



Enzymes have a high N:P ratio



Pigment/proteins have a high N:P ratio

Critères de sélection des espèces à mettre en culture

→ espèces caractéristiques de la baie de Seine, à fort/faible potentiel « bloomer »,

→ ...

Le choix s'est porté sur :

Diatomées

- *Guinardia delicatula* (66)
- *Thalassiosira gravida* (13)
- *Chaetoceros decipiens* (1)
- *Skeletonema marnoi*

Dinoflagellés

- *Lepidodinium chlorophorum* (12)
- *Prorocentrum micans* (17)
- *Scropsiella trochoidea* (11)

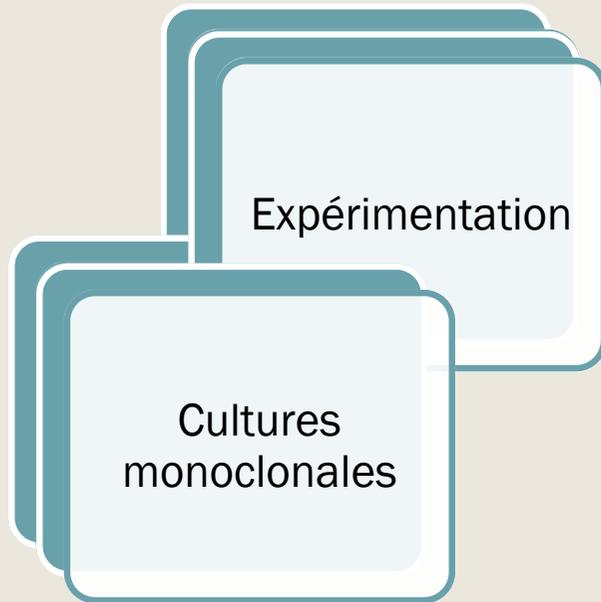
Cryptophytes

- *Chroomonas*
- *Rhodomonas*

Cyanobactéries

- *Synechococcus*

(*) nombre d'efflorescences > 100 000 cellules/L, données du REPHY sur les sites d'Antifer, Cabourg et Géfosse



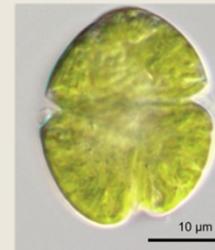
Culture semi-continue
Chambre thermostatée
Cycle lumière en fonction
de la saison.

Chroomonas sp.

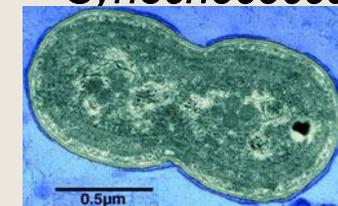


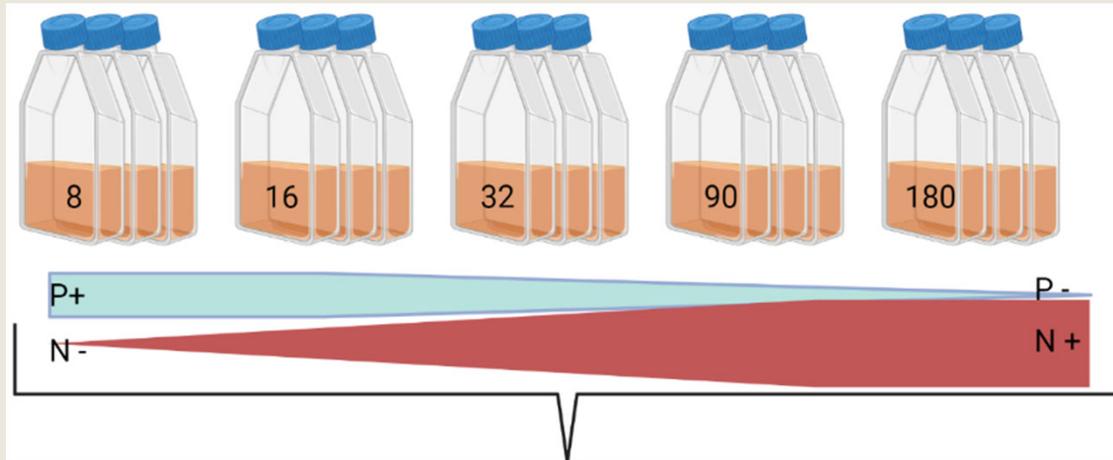
- *Diatomées* : *Guinardia delicatula*, *Thalassiosira gravida*, *Chaetoceros decipiens*, *Skeletonema marinoï* ;
- *Dinoflagellés* : *Scrippsiella trochoidea*, *Prorocentrum micans*, *Lepidodinium chlorophorum*
- *Chrytophytes*: *Chroomonas sp.*, *Rhodomonas sp*
- *Cyanobactéries*: *Synechococcus sp.*

Lepidodinium chlorophorum



Synechococcus

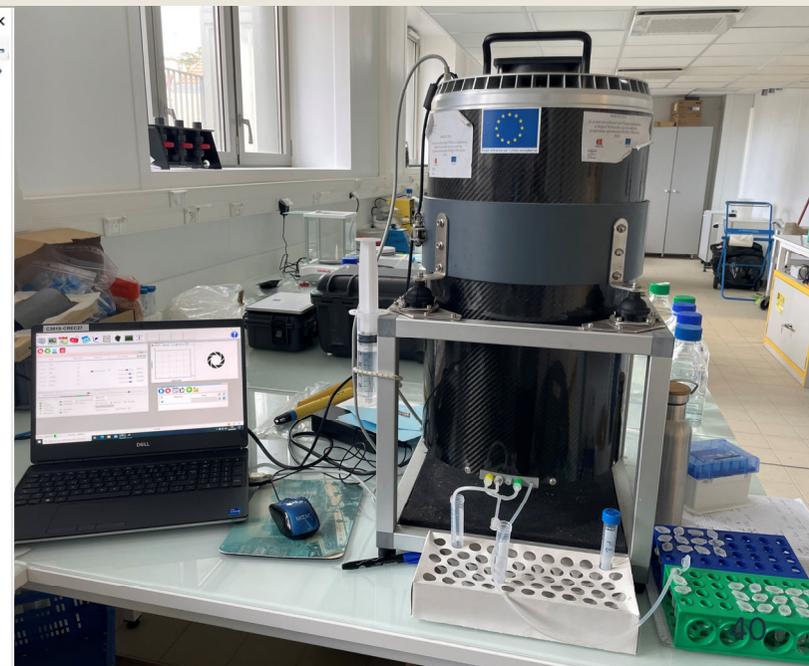
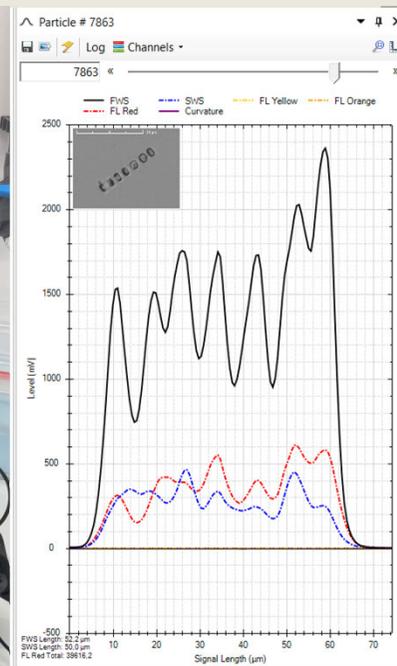




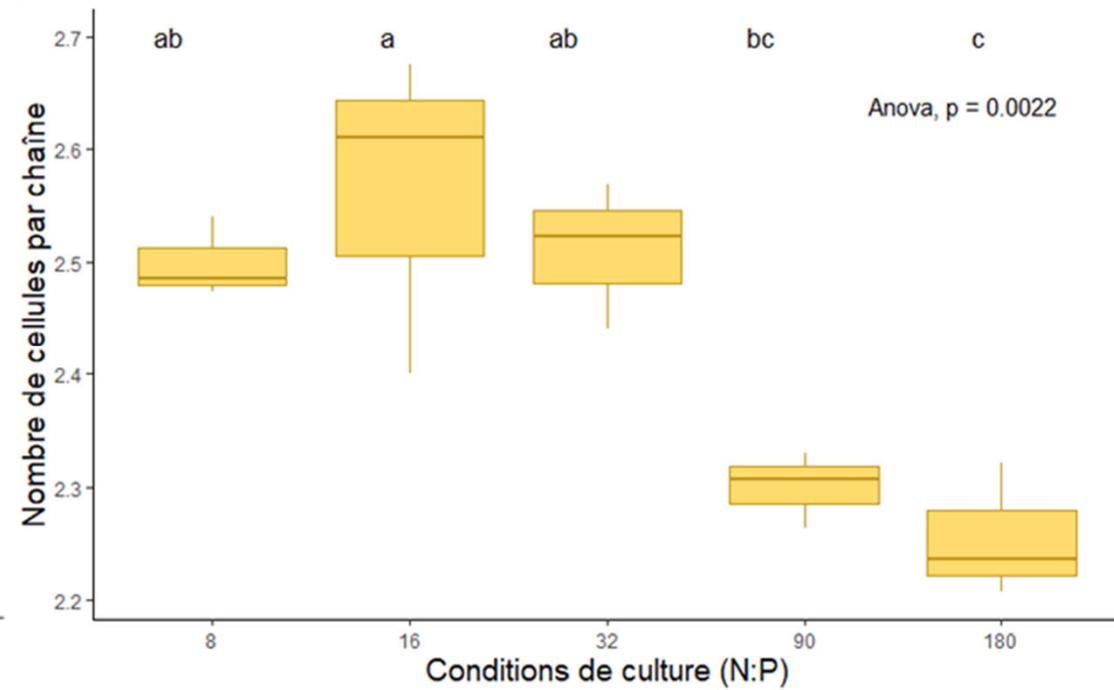
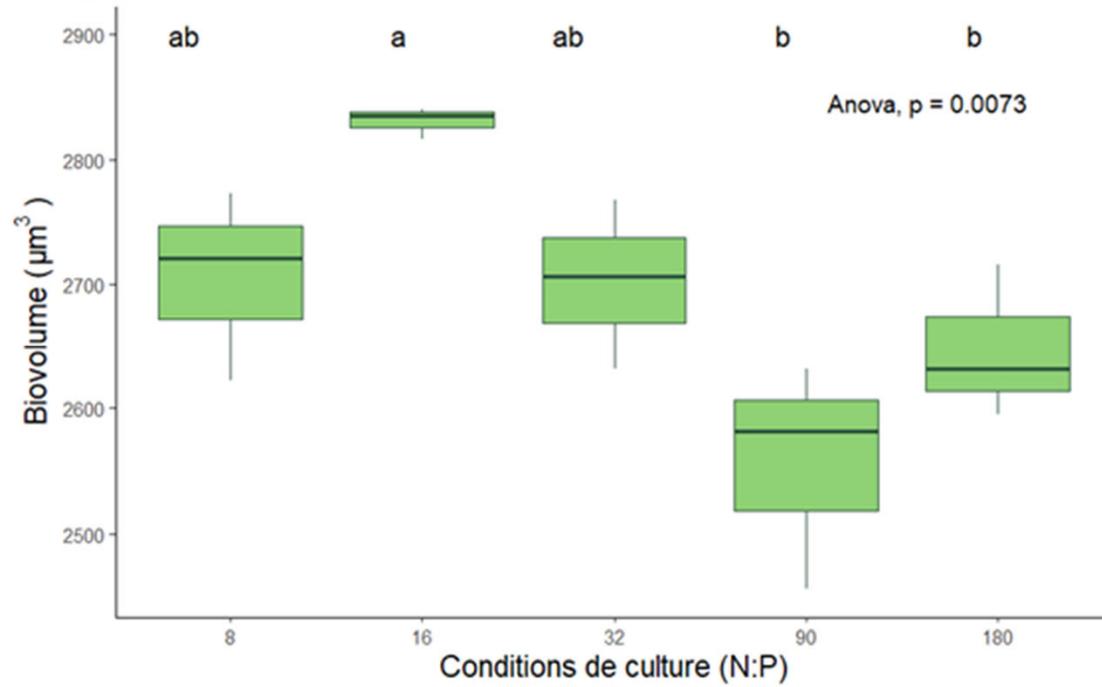
paramètres identiques que
microcosmes

+

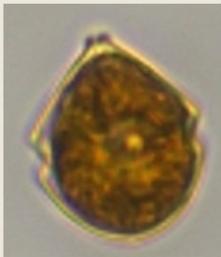
Paramètres de cinétique
d'absorption du N, P.



Taille



Scrippsiella trochoidea

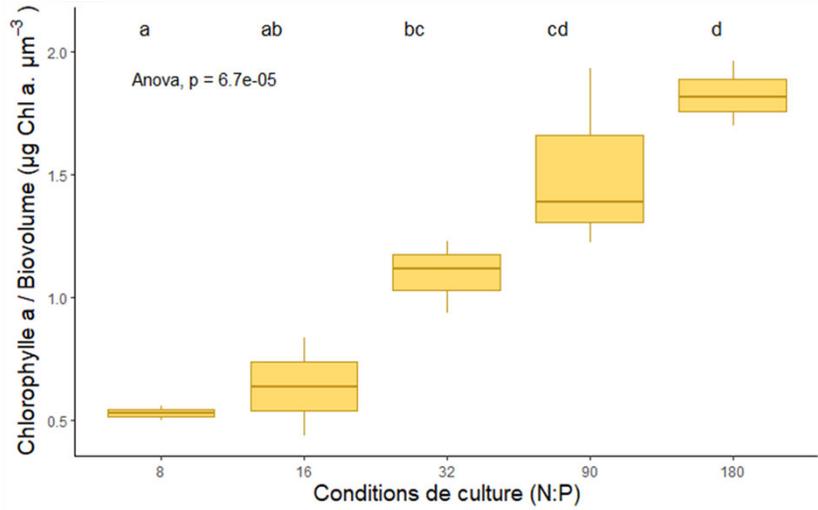


Skeletonema marinoi

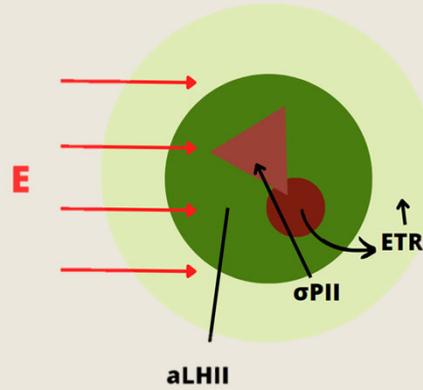
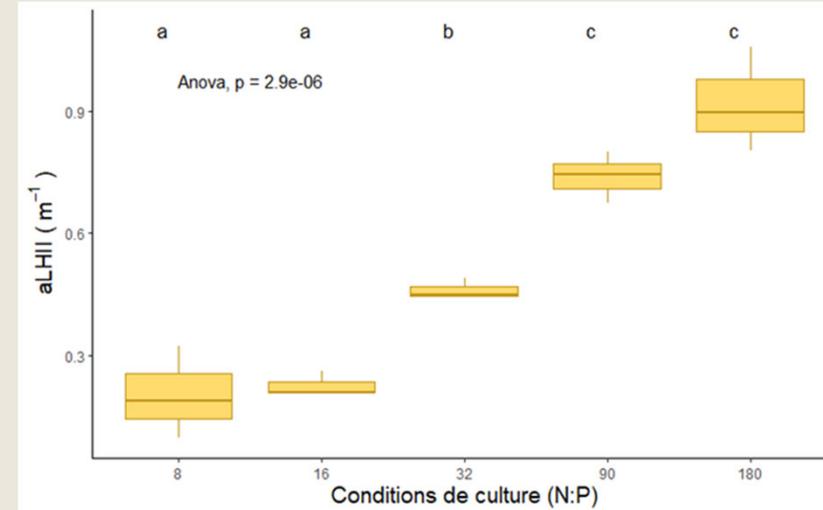


Skeletonema marinoi

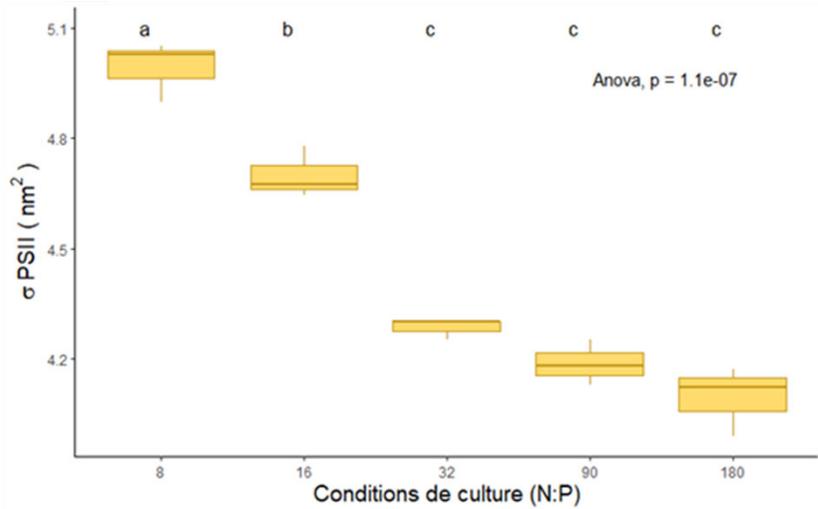
Chlorophylle a par unité de biovolume



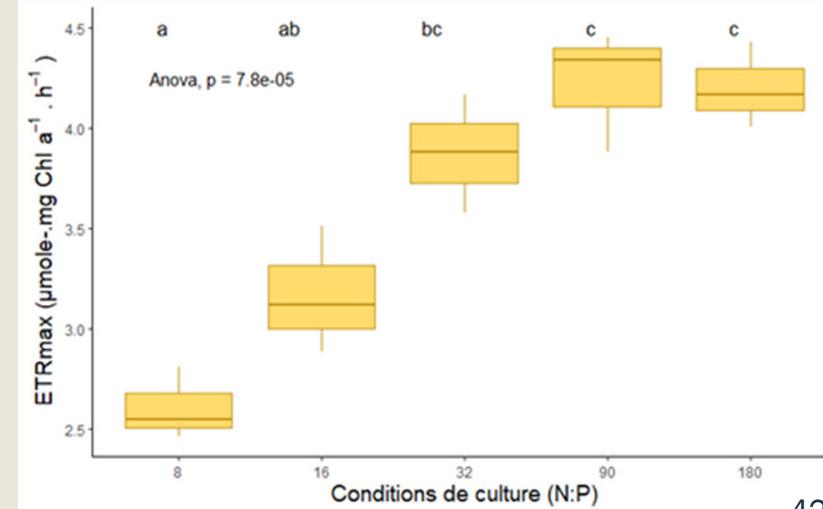
Absorption aLHII



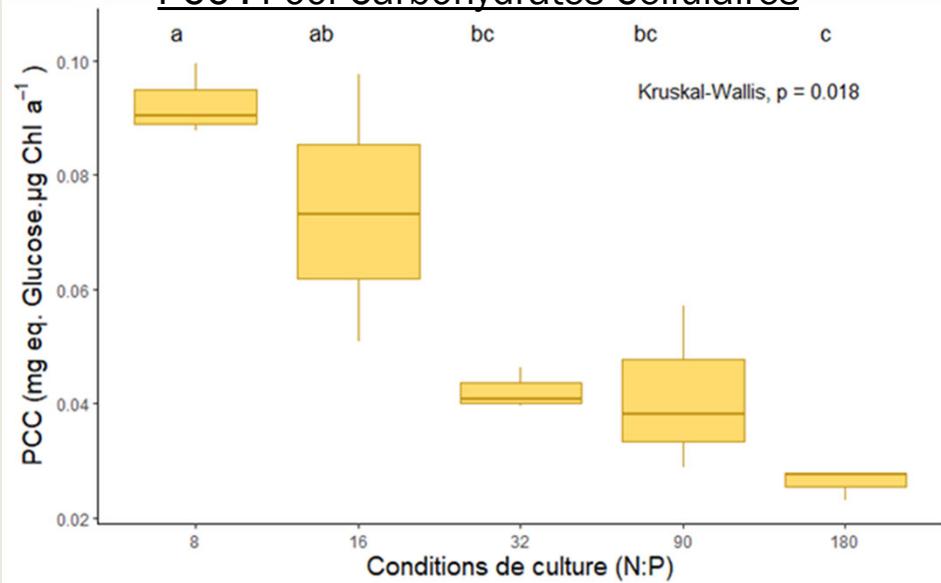
Surface d'absorption fonctionnelle σ_{PII}



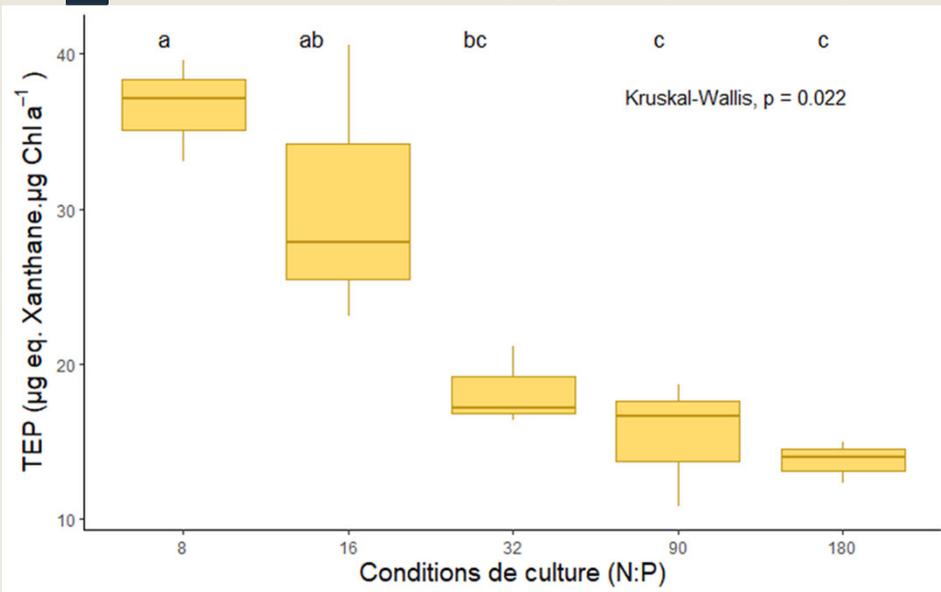
Taux de transfert d'électrons ETR



PCC : Pool Carbohydrates Cellulaires

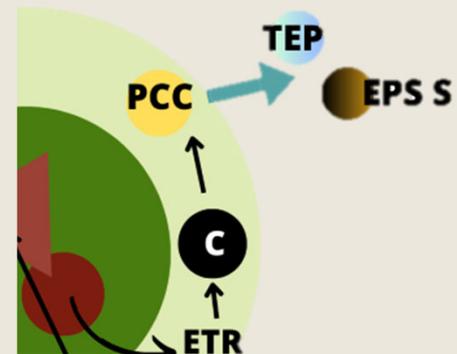
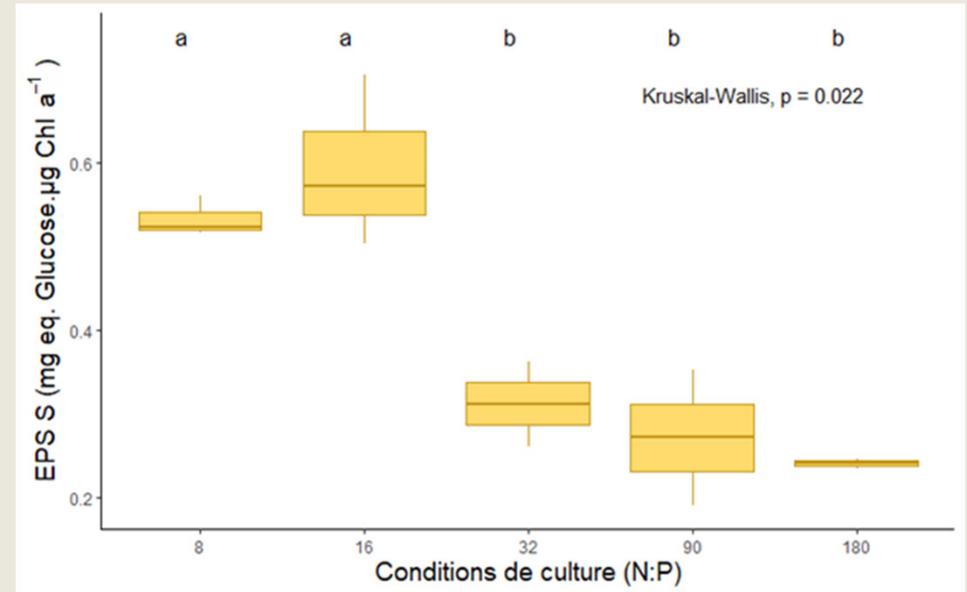


TEP : Particules exopolymériques transparentes

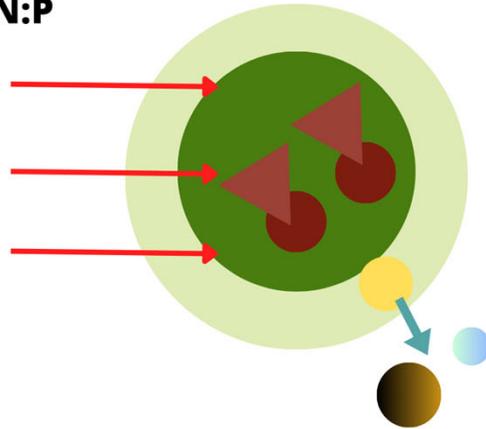


Production de carbone *skeletonema*

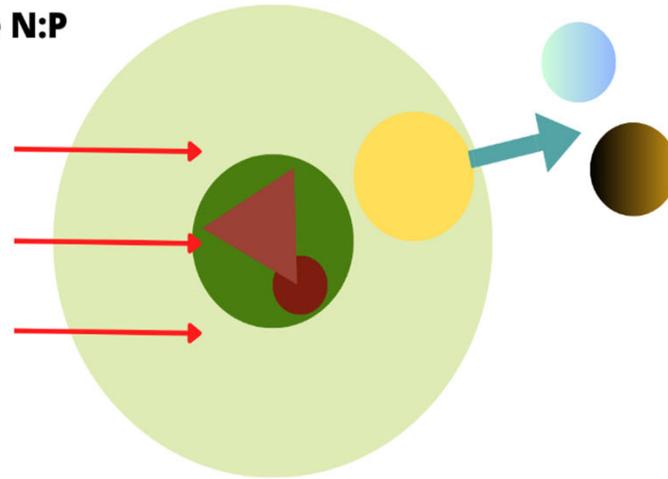
EPS : Exopolysaccharides



Fort N:P



Faible N:P



Cellule phytoplantonique



Chlorophylle *a*



Antennes collectrice du PSII



Energie lumineuse



Pool carbohydrates (PCC)



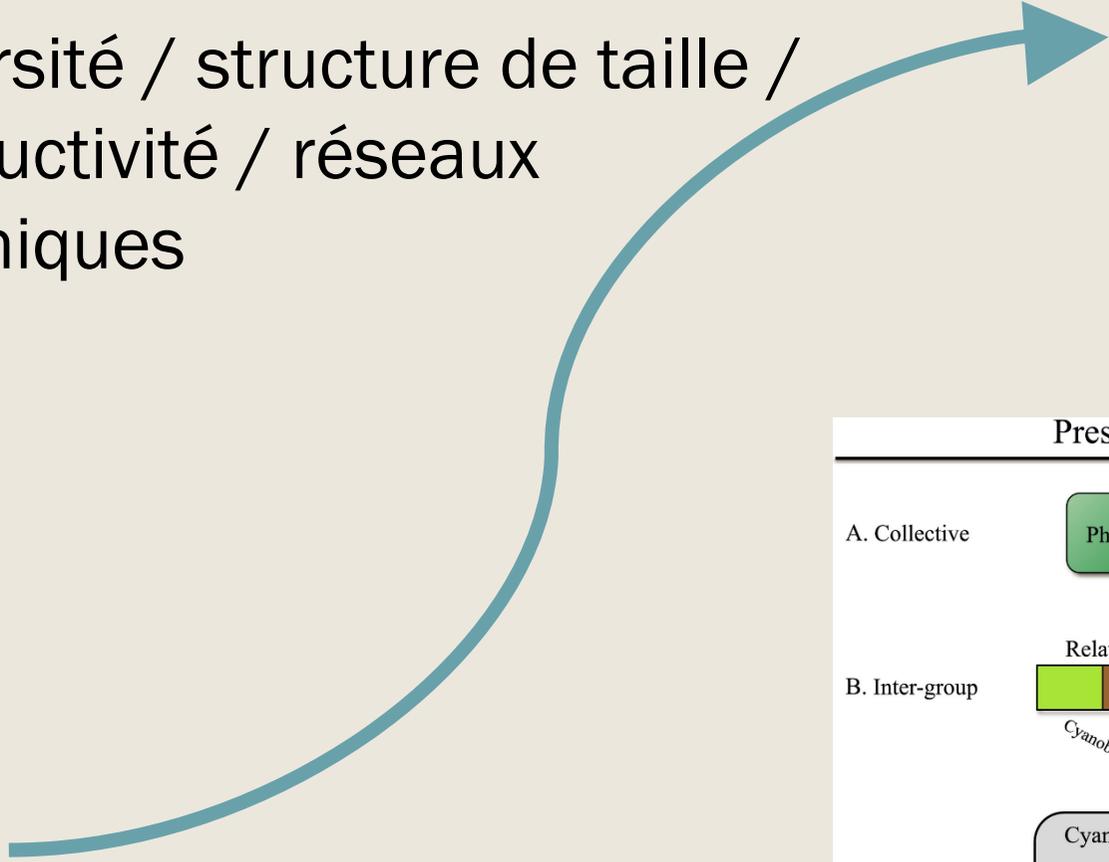
EPS Solubles



TEP

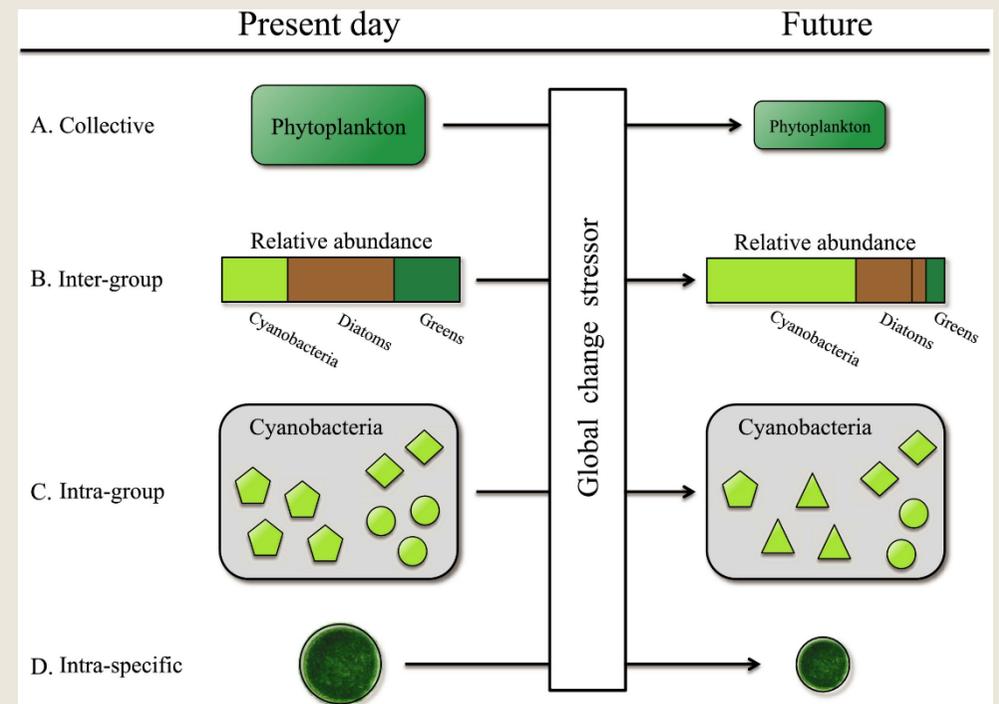
Trajectoire

Diversité / structure de taille /
productivité / réseaux
trophiques



Baie de Seine / Manche

Ecosystèmes côtiers anthropisés



MERCI