



Thèse de doctorat spécialité : océanographie
Champ disciplinaire : biogéochimie-optique marine

Dynamique spatiale et temporelle de la biomasse organique particulaire synthétisée dans une région océanique fortement influencée par la fixation de diazote atmosphérique (campagne océanographique OUTPACE dans le Pacifique tropical sud-ouest)

~~Le 22 Avril 2020, 03 Juin 2020~~

Alain FUMENIA

Sophie RABOUILLE	Université Pierre et Marie Curie	Rapporteur
David ANTOINE	Curtin University	Rapporteur
Hervé CLAUSTRE	Université Pierre et Marie Curie	Membre du jury
Bernard QUEGUINER	Université Aix-Marseille	Membre du jury
Thierry MOUTIN	Université Aix-Marseille	Directeur de thèse
Anne PETRENKO	Université Aix-Marseille	Directrice de thèse

1- INTRODUCTION : Question principale

Définir les différents processus qui contrôlent la dynamique spatiale et temporelle de la biomasse organique particulaire synthétisée dans la couche éclairée des eaux oligotrophes du Pacifique tropical sud-ouest (WTSP)?

Couche éclairée (Z_{001})
(\neq couche euphotique*)

Eaux de surface (couche de mélange)

influencée par la fixation de N_2

Eaux de subsurface (haut de la thermocline)

au niveau du maximum de $Chl a$ de subsurface

Thermocline permanente

Couche non éclairée
Voir manuscrit de thèse

Circulation des masses d'eau de la thermocline

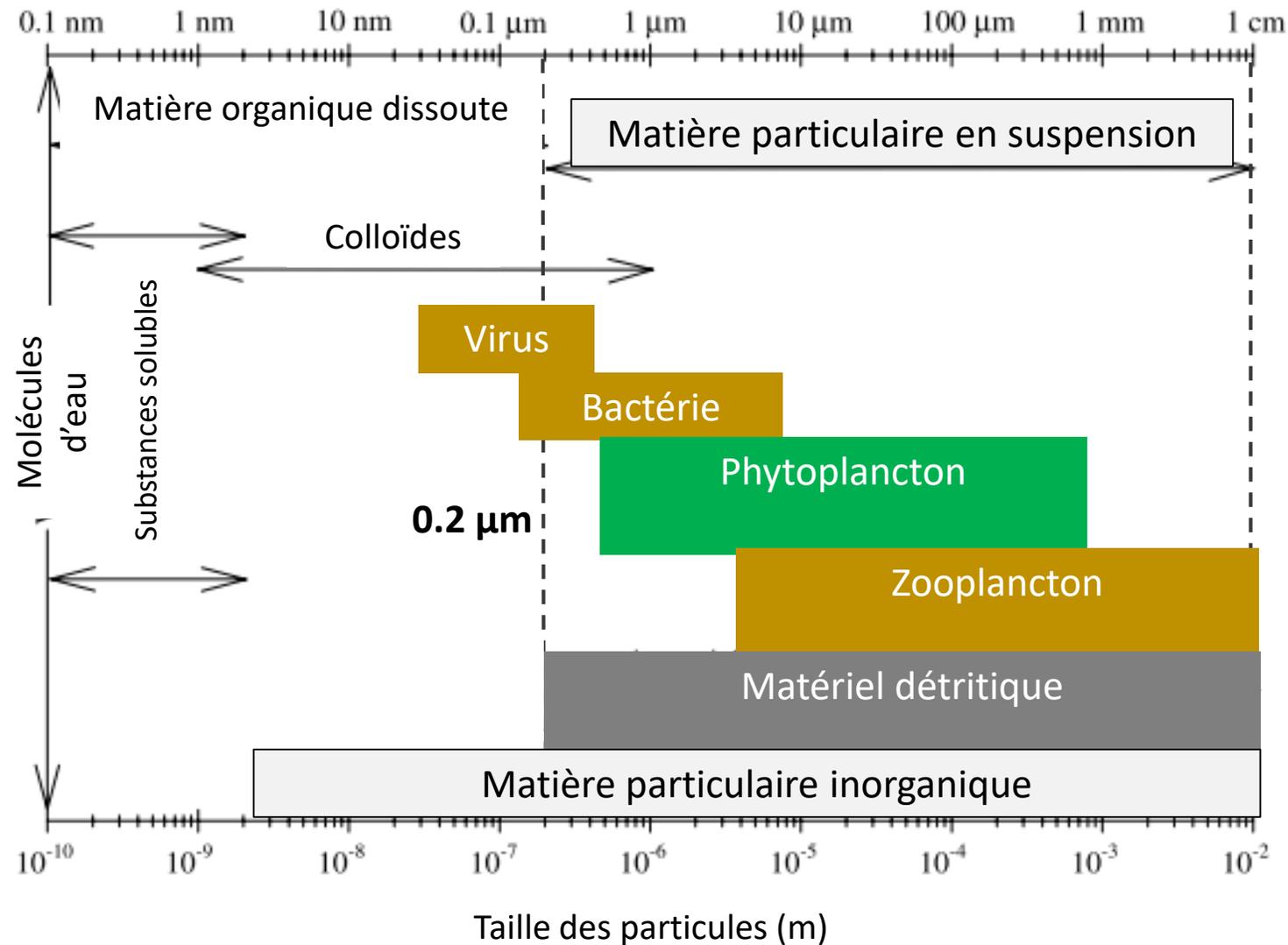
Reminéralisation MOP

N^*

*Couche euphotique (Z_{01}) = $P-R > 0$ ou 1% du flux mesuré juste au-dessus de l'interface air-mer (Ryther, 1956)

1- INTRODUCTION : La matière organique particulaire océanique

Matière Particulaire



Matière Organique Particulaire

COP = Carbone organique particulaire

NOP = Azote organique particulaire

POP = Phosphate organique particulaire

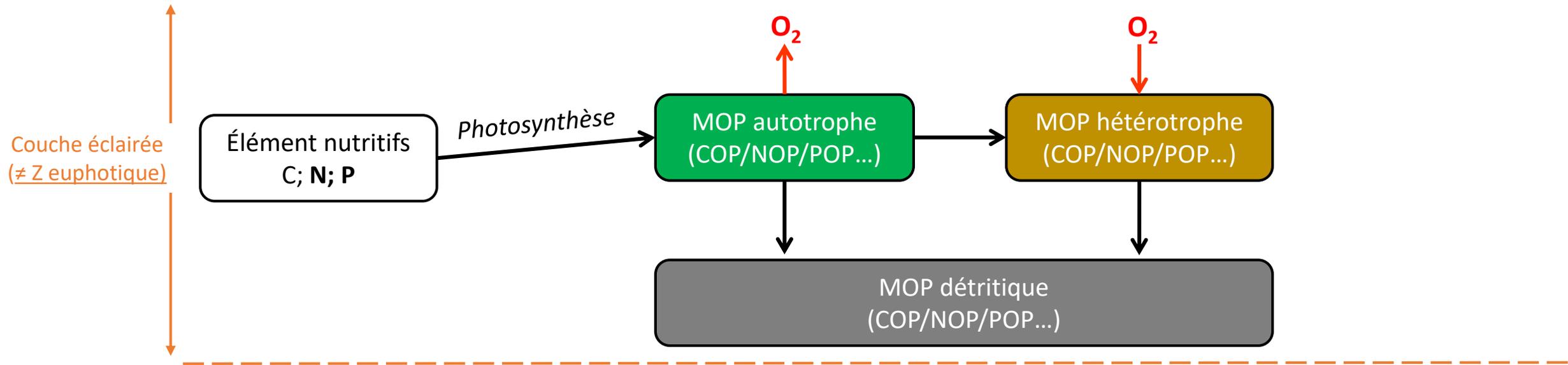
Etc...

Diagramme schématisant montrant les divers constituants dans l'eau de mer (Modifié de *Stramski et al.*, 2004)

1- INTRODUCTION : Sources et pertes de MOP dans la couche éclairée

Sources = Production primaire (photosynthèse)

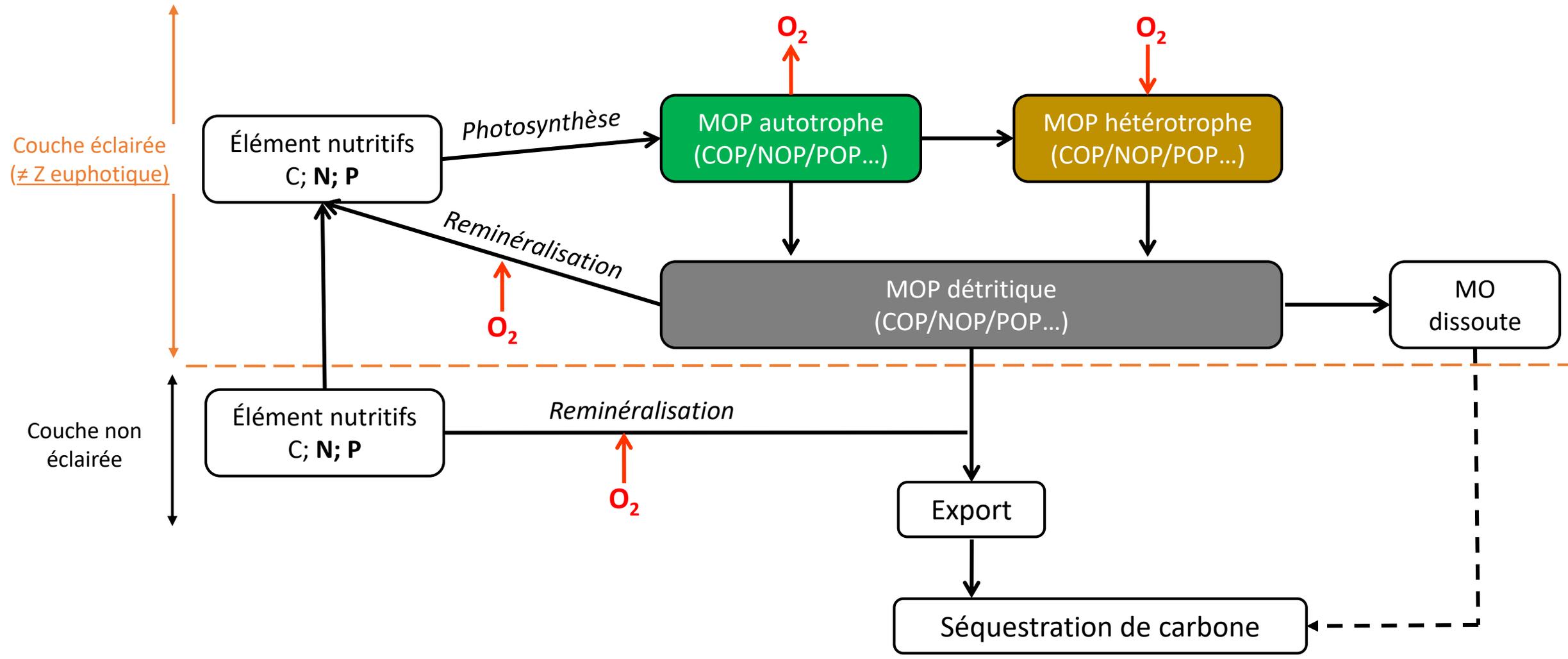
Production secondaire



1- INTRODUCTION : Sources et pertes de MOP dans la couche éclairée

Sources = Production primaire (photosynthèse)
Production secondaire

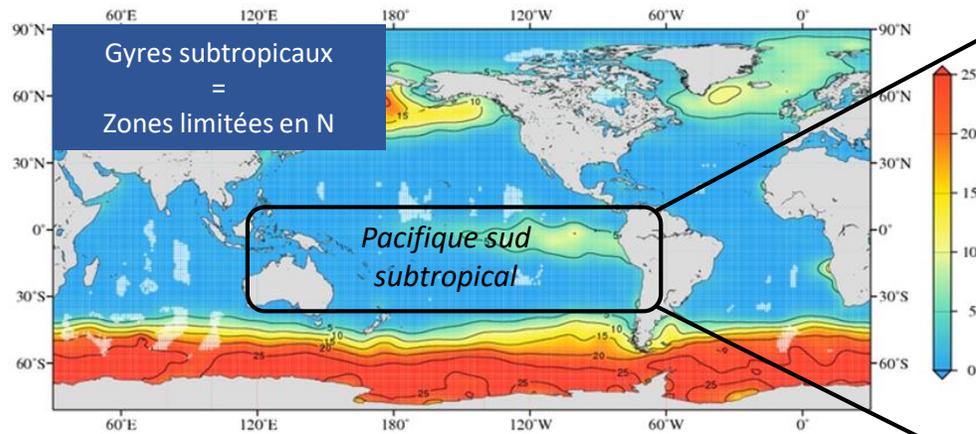
Pertes = Reminéralisation, transfert dissous, export



1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

L'océan Pacifique sud subtropical, un désert océanique (Morel et al., 2010)

[NO₃⁻] dans les eaux de surface
(World Ocean Atlas 2013)



[Chl a] de surface (mars 2018)

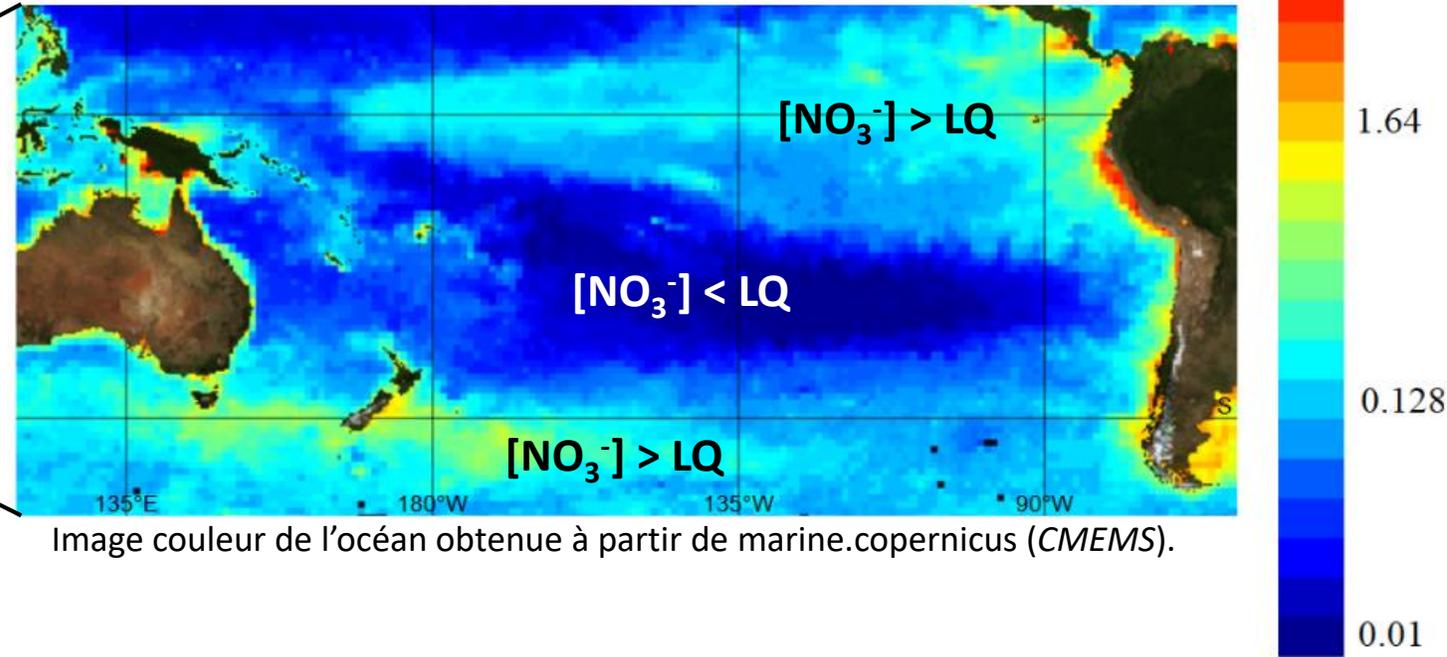


Image couleur de l'océan obtenue à partir de marine.copernicus (CMEMS).

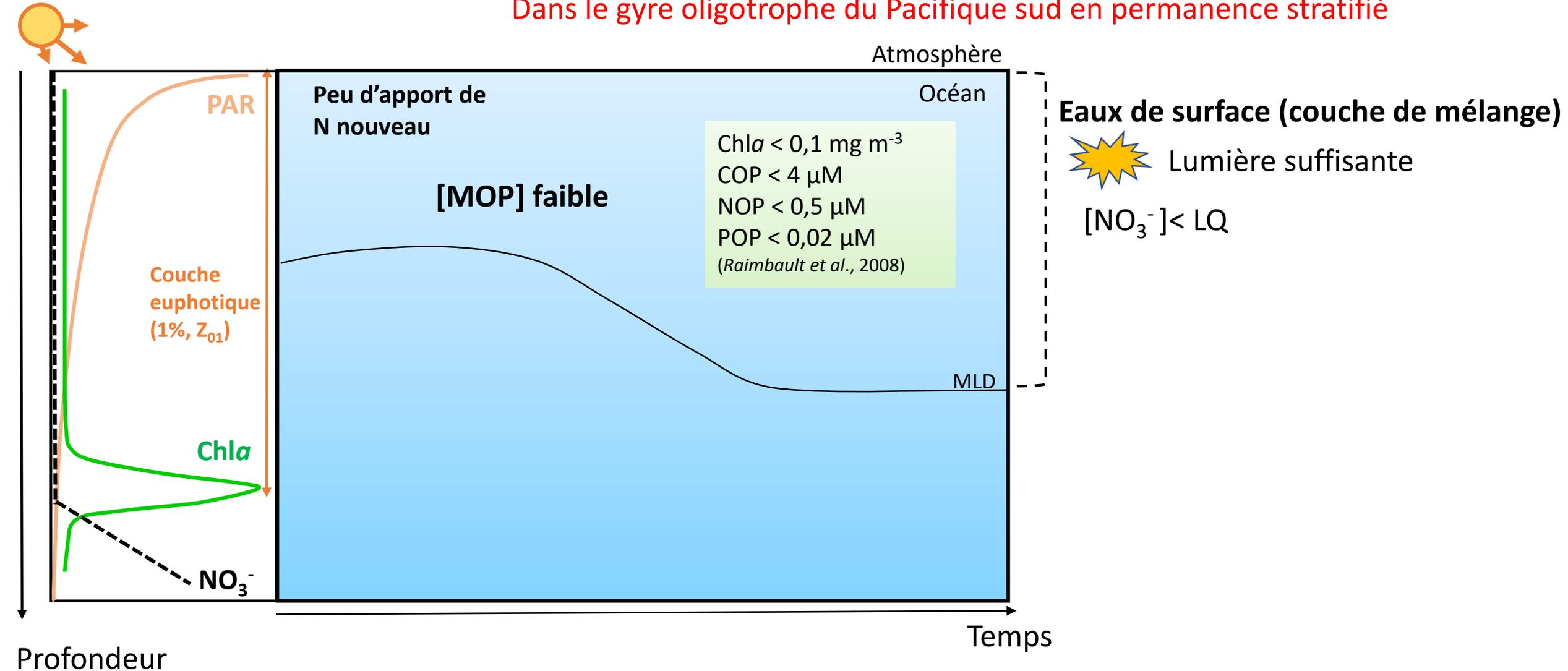
L'azote, facteur limitant la production de MOP dans la couche éclairée des gyres subtropicaux

Gyre du Pacifique sud **oligotrophe**
= vaste zone d'un **bleu profond** reflétant une très faible activité biologique

1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

L'océan Pacifique sud subtropical, deux systèmes phytoplanctoniques

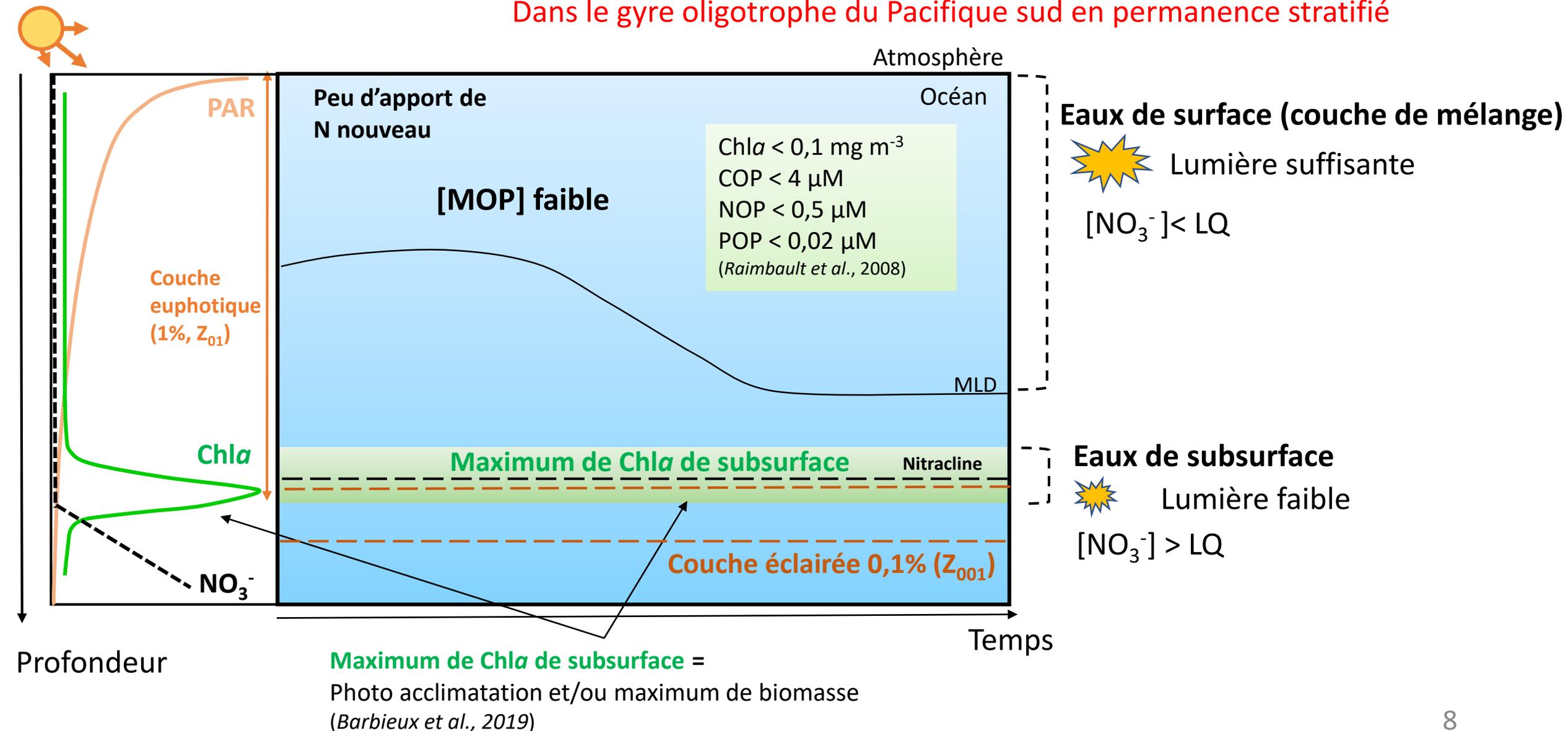
Dans le gyre oligotrophe du Pacifique sud en permanence stratifié



1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

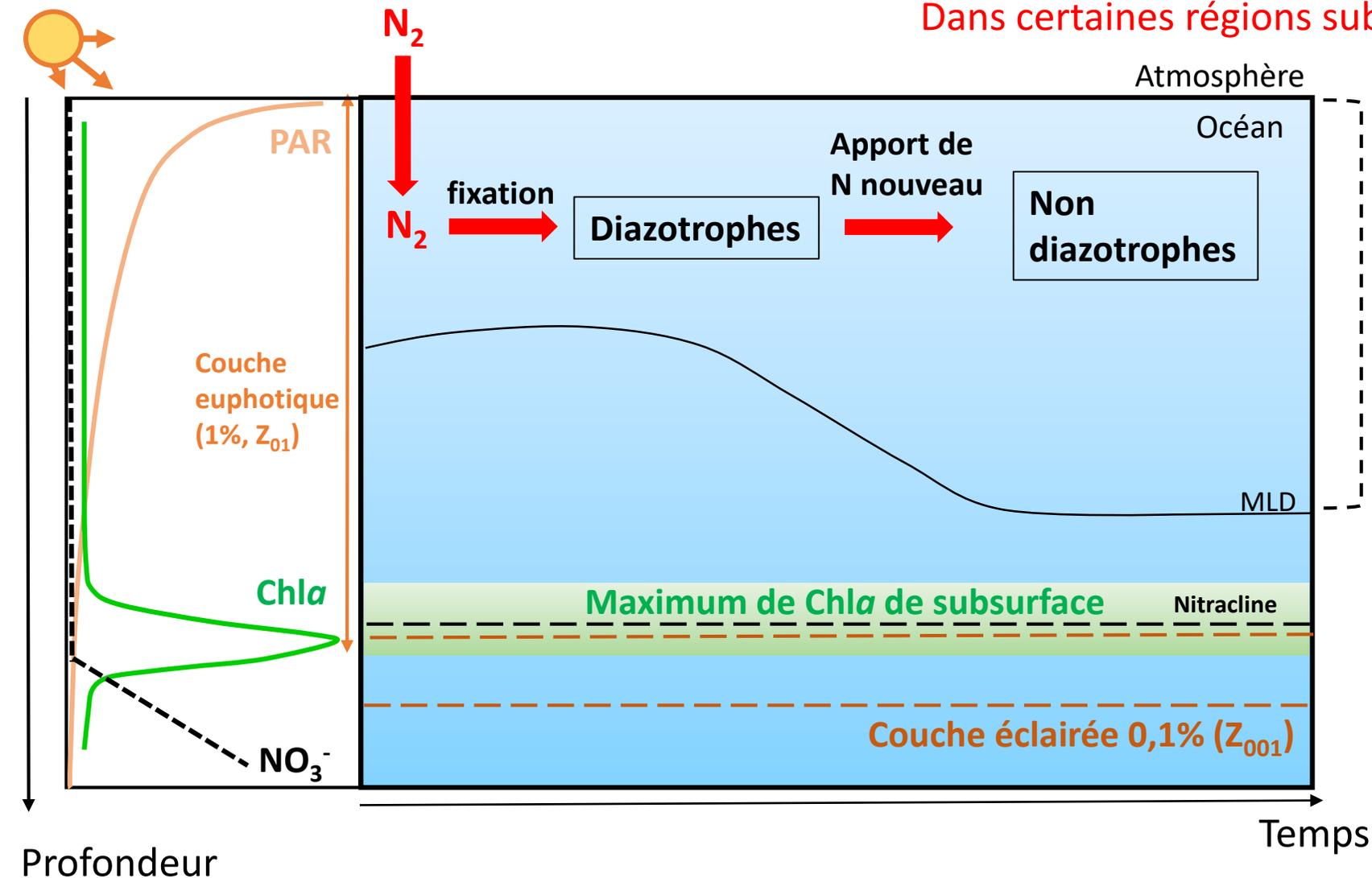
L'océan Pacifique sud subtropical, deux systèmes phytoplanctoniques

Dans le gyre oligotrophe du Pacifique sud en permanence stratifié



1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

La diazotrophie, alternative à la pénurie de NO_3^-



Eaux de surface (couche de mélange)



Lumière suffisante

$[\text{NO}_3^-] < \text{LQ}$

Diazotrophes = Organismes capables de réduire le N_2
(Carpenter and Capone 1992 ; Karl et al., 2002)

Diazotrophie = Principale source externe de N dans l'océan
($140 \pm 50 \text{ Tg N par an dans l'océan, Gruber, 2004}$)

1- INTRODUCTION : La fixation de N₂ dans l'océan Pacifique sud-ouest

Mesures *in situ* en mer de la fixation de N₂ dans l'océan:



Photo d'efflorescence de diazotrophes pendant la campagne OUTPACE dans le WTSP (mars/avril 2015)

Filamenteux



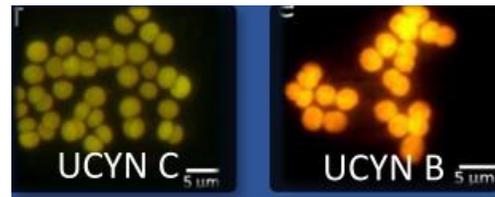
Trichodesmium

Symbiotique



Richelia intracell.

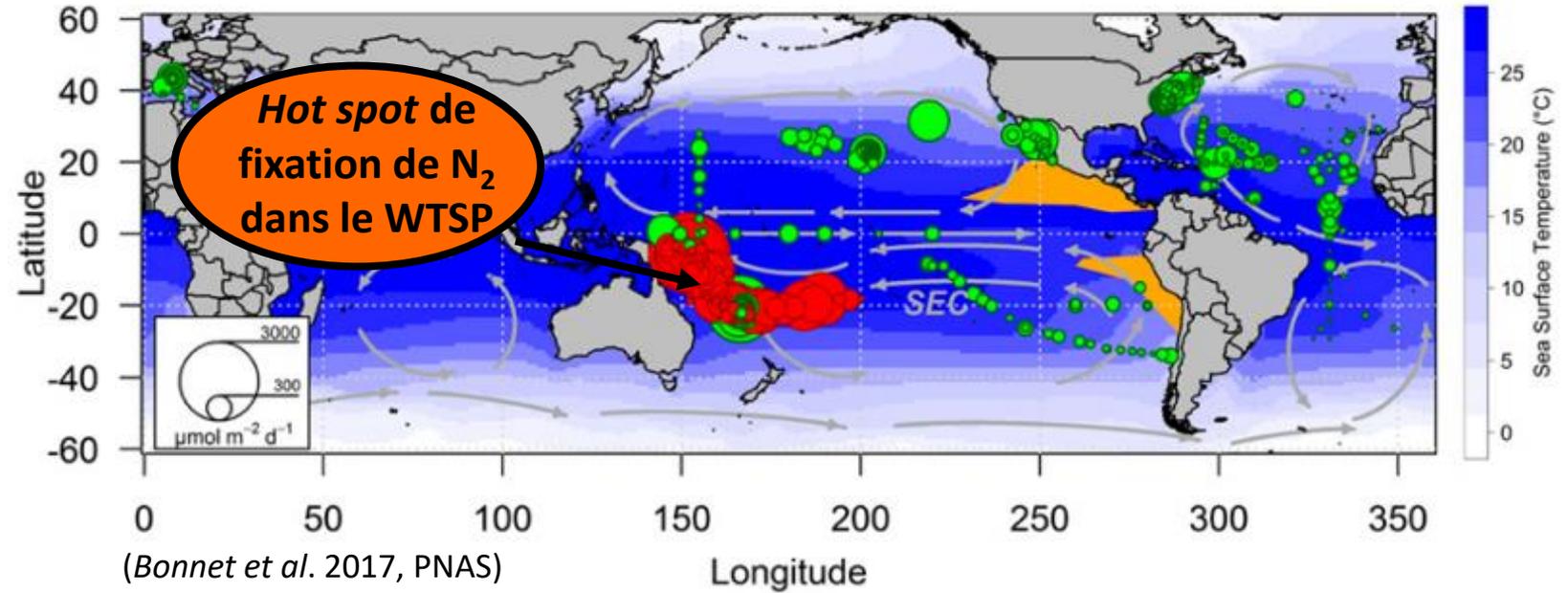
Unicellulaire



UCYN C $5\mu\text{m}$

UCYN B $5\mu\text{m}$

Taux de fixation de N₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{j}^{-1}$)



Fixation de N₂ dans le « hot spot » du WTSP
= $570 \mu\text{mol N m}^{-2} \text{j}^{-1}$

1- INTRODUCTION : Questions

Définir les différents processus qui contrôlent la dynamique spatiale et temporelle de la biomasse organique particulaire synthétisée dans la couche éclairée des eaux oligotrophes du WTSP ?

Eaux de surface (couche de mélange)



1. Quelle est la dynamique de la MOP dans les eaux de surface de la région inexplorée du WTSP soumise à une intense fixation de N_2 ?

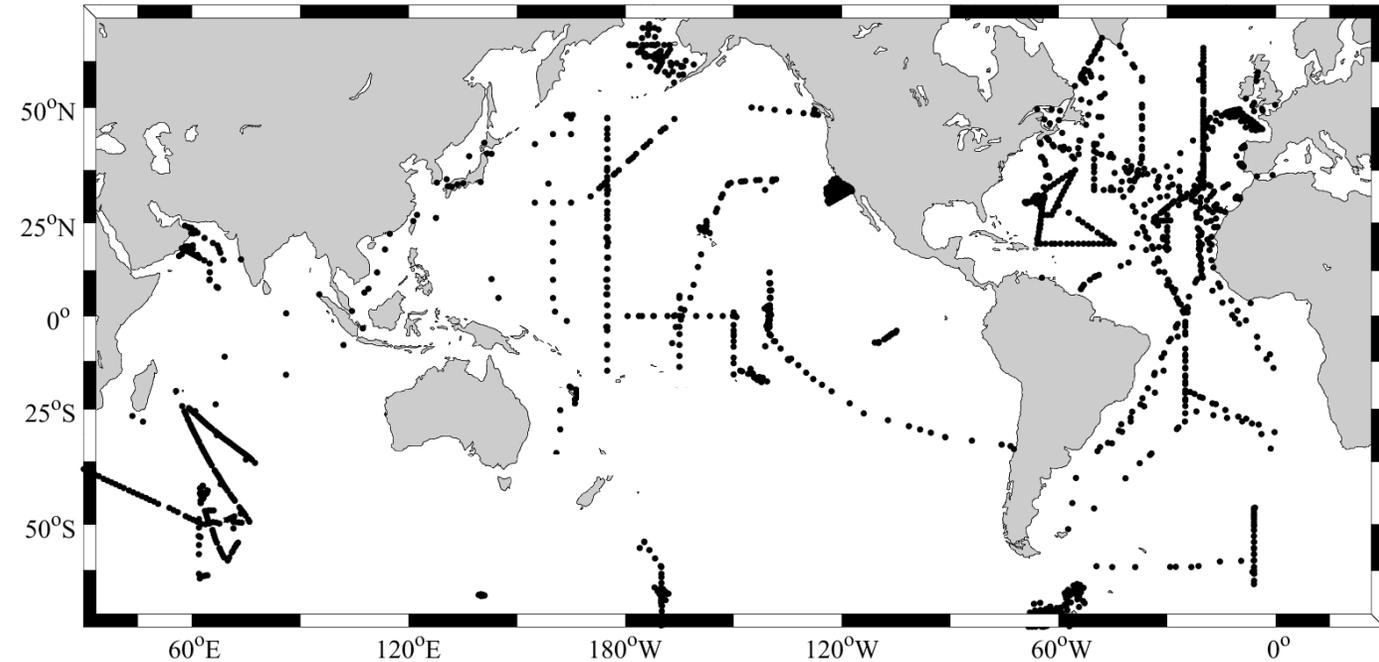
1- INTRODUCTION : Acquisition de données

Mesures *in situ* lors de campagnes en mer
(très précises à un instant donné)

→ COP, utilisation d'un CHN Perkin

Alternative aux mesures de COP dans les milieux
oligotrophes

→ NOP et POP, utilisation de la méthode
d'oxydation humide



Mesures de NOP dans l'océan

(d'après le regroupement de données disponibles proposé dans *Martiny et al., 2014*)

1- INTRODUCTION : Acquisition de données

Mesures *in situ* lors de campagnes en mer
(très précises à un instant donné)

→ COP, utilisation d'un CHN Perkin

Alternative aux mesures de COP dans les milieux oligotrophes

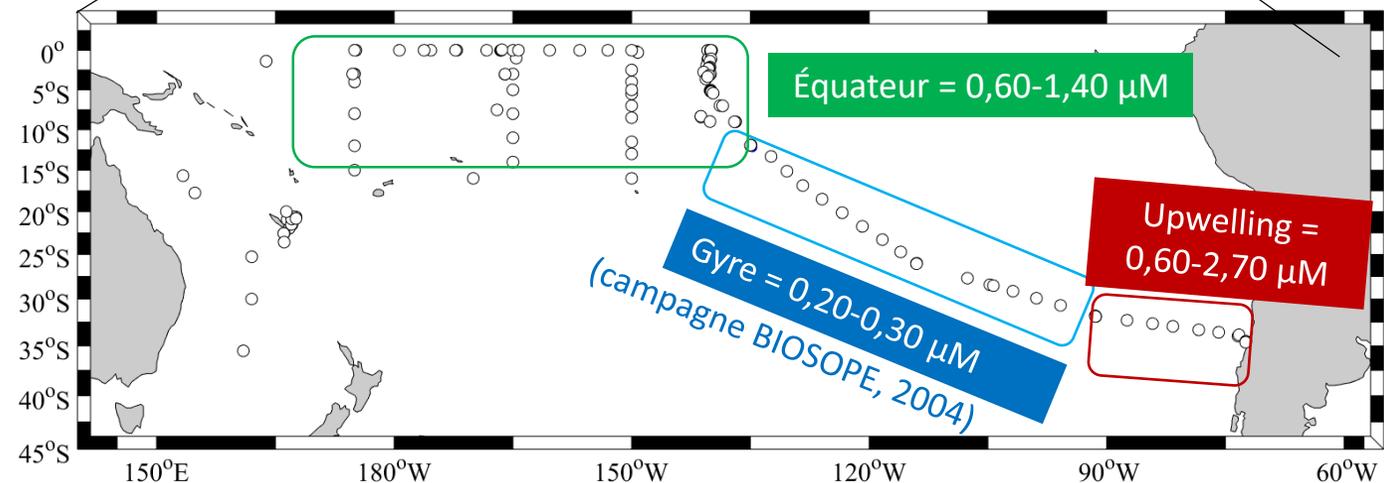
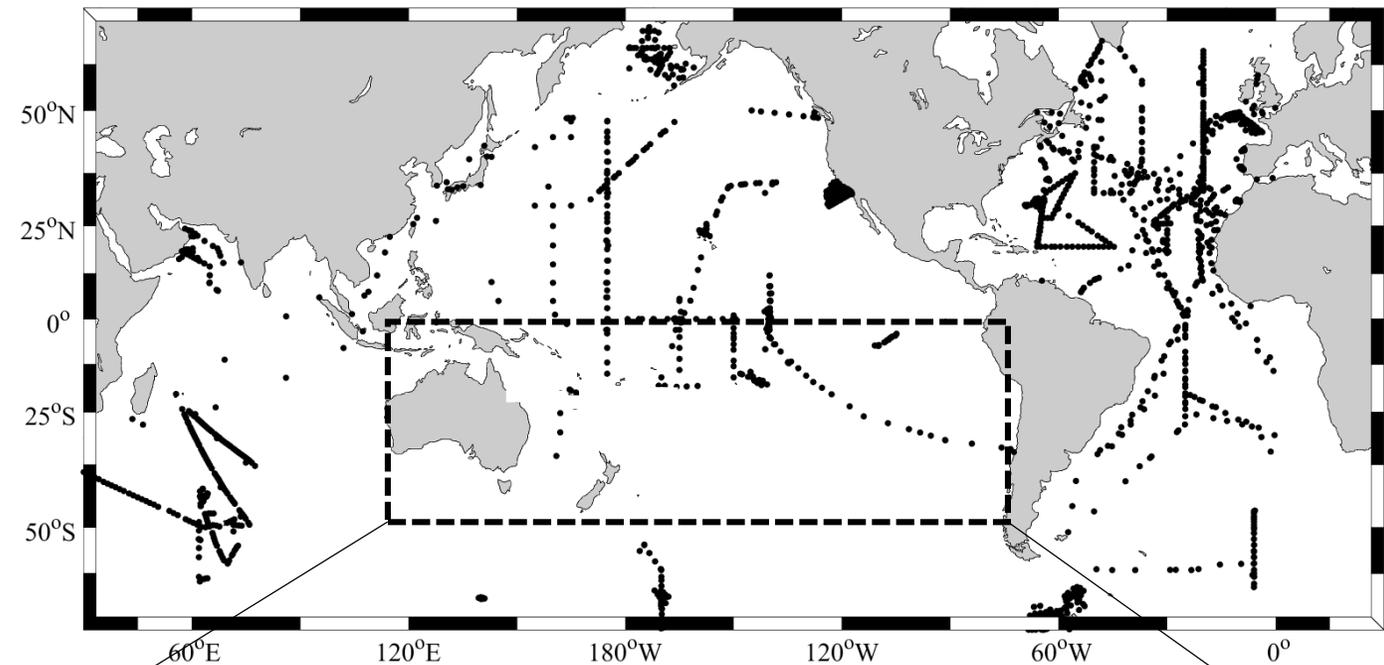
→ NOP et POP, utilisation de la méthode d'oxydation humide

Dans l'océan Pacifique sud

→ Très peu de mesures de NOP

→ Régions **Équatoriales** et **Upwelling**
= régions riches en élément nutritifs

→ **Gyre** = régions très pauvres en éléments nutritifs

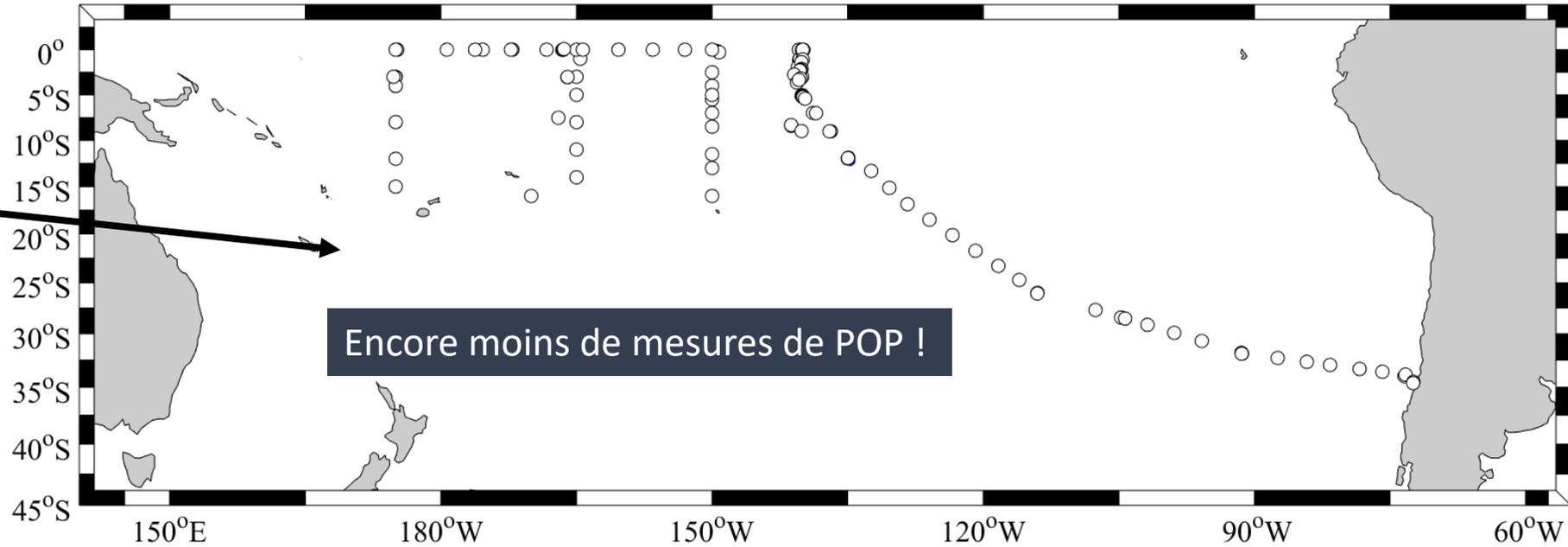


Mesures de NOP dans l'océan

(d'après le regroupement de données disponibles proposé dans *Martiny et al., 2014*)

1- INTRODUCTION : Acquisition de données

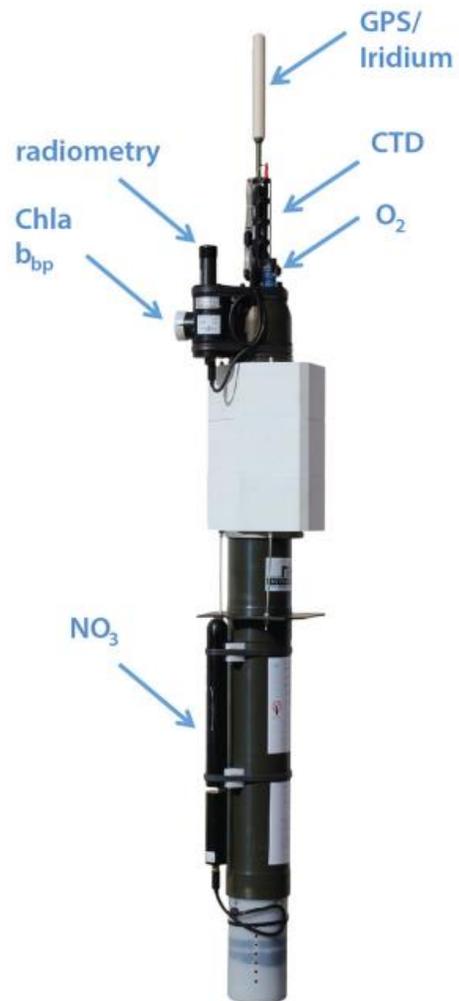
Mesures de POP dans l'océan Pacifique sud



Alternative aux mesures *in situ* ? Les proxys optiques de la MOP

1- INTRODUCTION : Acquisition de données

Mesures à l'aide de flotteurs *Biogeochemical Argo*



BGC-Argo
type PROVOR

Rappel définition b_{bp}

= Coefficient de rétrodiffusion particulaire

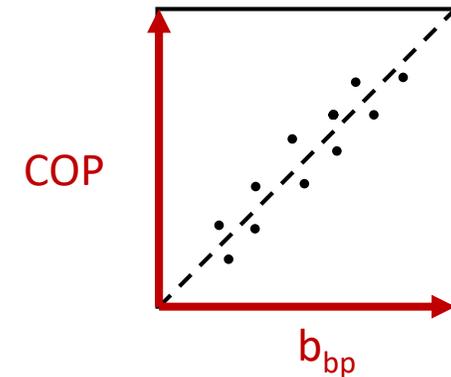
= Propriété Optique Inhérente (IOP)

= Pas sensible au matériel dissous

Relation entre le b_{bp} et COP

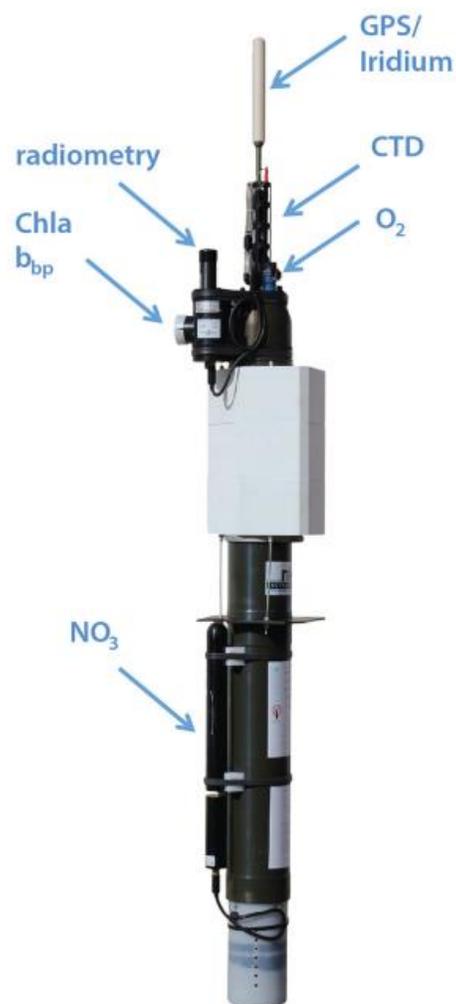
b_{bp} = Proxy du COP dans les eaux du large

(Stramski et al., 1999, 2008; Loisel et al., 2001; Balch et al., 2010 ; Cetinić et al., 2012)



1- INTRODUCTION : Acquisition de données

Mesures à l'aide de flotteurs *Biogeochemical Argo*



BGC-Argo
type PROVOR

Rappel définition b_{bp}

- = Coefficient de rétrodiffusion particulaire
- = Propriété Optique Inhérente (IOP)
- = Pas sensible au matériel dissous

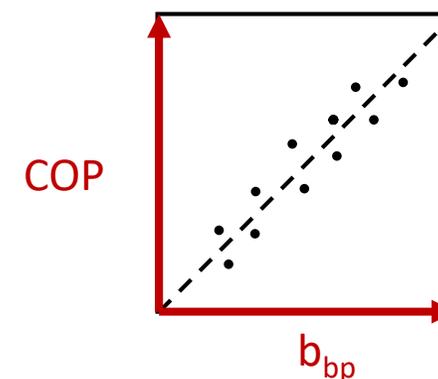
Relation entre le b_{bp} et COP

b_{bp} = Proxy du COP dans les eaux du large

(Stramski et al., 1999, 2008; Loisel et al., 2001; Balch et al., 2010 ; Cetinić et al., 2012)

De quoi dépend la relation ?

- Des variations de biomasse organique particulaire
- Précision des mesures *in situ* de COP
- Précision des mesures *in situ* de b_{bp}
- Indice de réfraction
- Taille/morphologie des particules présentes
- Structures des communautés
- Composition (vivant vs détritique)



Nécessaire de développer
des proxys optiques à une
échelle régionale

1- INTRODUCTION : Questions

Définir les différents processus qui contrôlent la dynamique spatiale et temporelle de la biomasse organique particulaire synthétisée dans la couche éclairée des eaux oligotrophes du WTSP ?

Eaux de surface (couche de mélange)



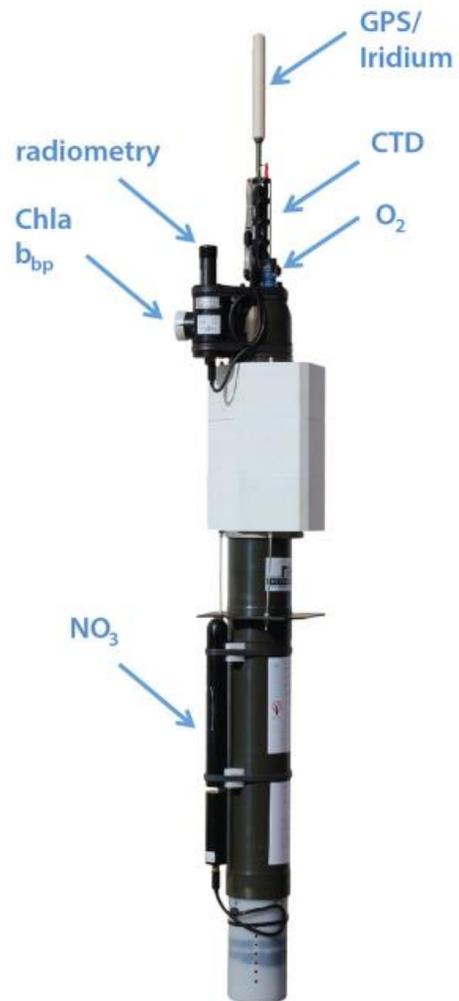
1. Quelle est la dynamique de la MOP dans les eaux de surface de la région inexplorée du WTSP soumise à une intense fixation de N_2 ?



2. Peut on définir un nouveau proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP ?
Dynamique spatiale et temporelle de la MOP en surface ?

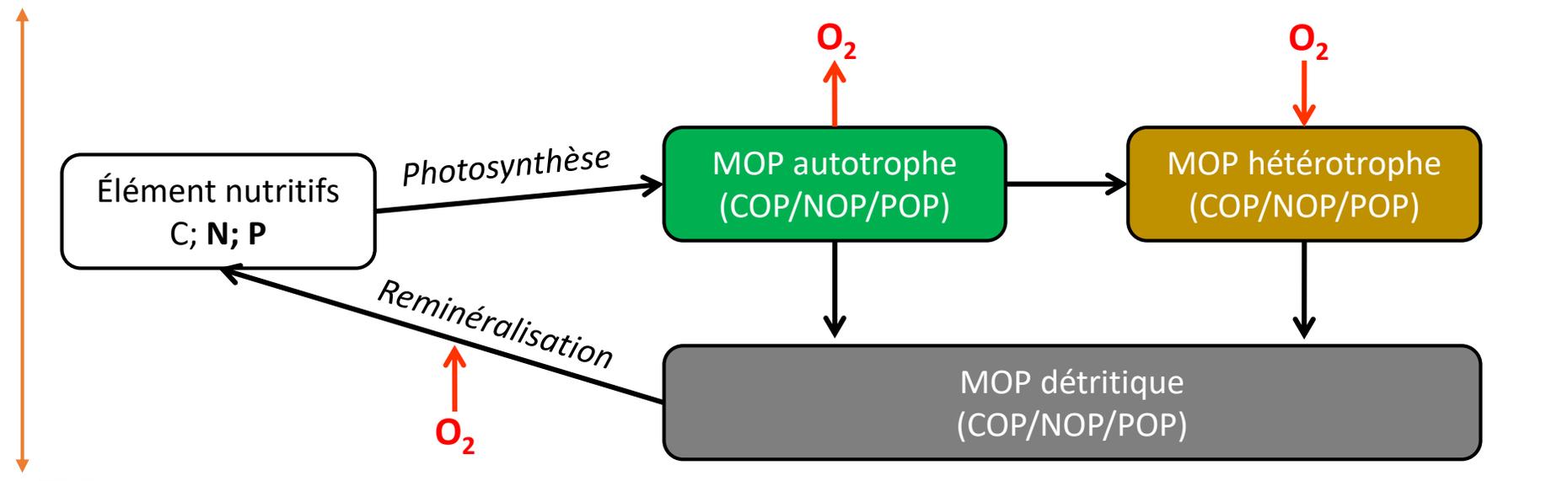
1- INTRODUCTION : Production communautaire nette

Mesures à l'aide de flotteurs *Biogeochemical Argo*



➤ O_2 = Permet de calculer la **Production Communautaire Nette (NCP)**
= BILAN NET

$$NCP = [O_2] \text{ produit par le phytoplancton} - [O_2] \text{ total respiré}$$



Mesures de NCP dans l'océan

➤ **Mesures de NCP réalisées entre la surface et le 1% de lumière**

(Voir synthèse des mesures de NCP, *Williams et al. 2004*)

Cependant,



**SHOULD WE CONTINUE TO
USE THE 1% LIGHT DEPTH
CONVENTION FOR
ESTIMATING THE
COMPENSATION DEPTH
OF PHYTOPLANKTON FOR
ANOTHER 70 YEARS?**

*Karl Banse, School of Oceanography, Box 357940, University of
Washington, Seattle, WA, 98195-7940 USA;
banse@ocean.washington.edu*

(Banse, 2004)

Notamment dans les eaux très claires du Pacifique tropical

➤ **60 % du contenu en Chl a est sous le 1% de lumière**

(Claustre et al. 2008)

➤ **Processus sous le 1% de lumière peu étudiés**

1- INTRODUCTION : Questions

Définir les différents processus qui contrôlent la dynamique spatiale et temporelle de la biomasse organique particulaire synthétisée dans la couche éclairée des eaux oligotrophes du Pacifique tropical sud-ouest ?

Eaux de surface (couche de mélange)

➤ 1. Quelle est la dynamique de la MOP dans les eaux de surface de la région inexplorée du WTSP soumise à une intense fixation de N_2 ?

➤ 2. Peut on définir un nouveau proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP ?
Dynamique spatiale et temporelle de la MOP en surface ?

Eaux de subsurface

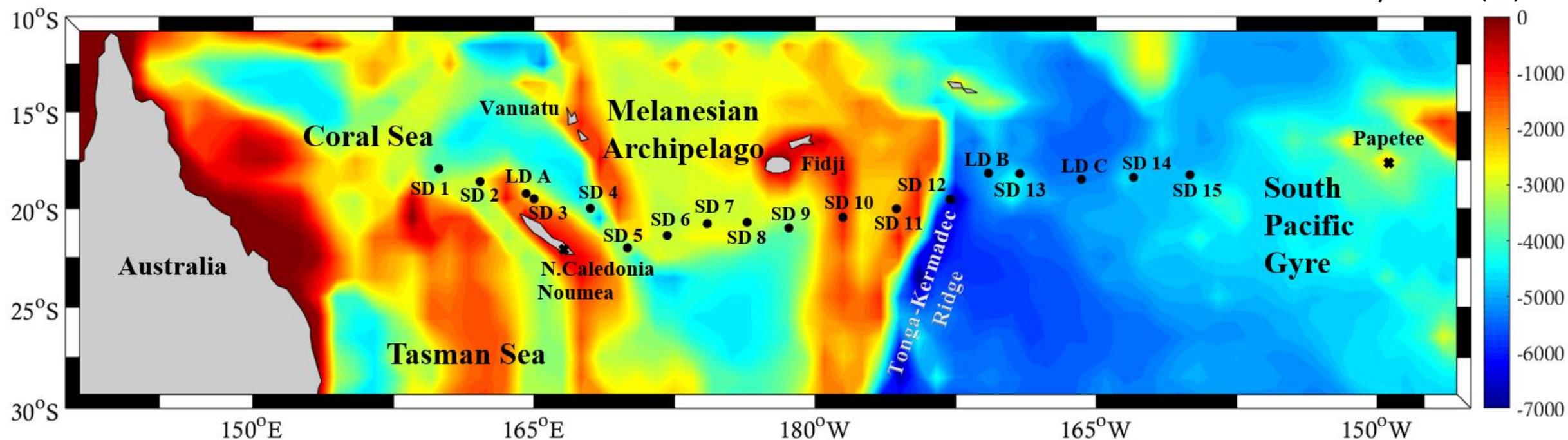
➤ 3. Quelle est la dynamique spatiale et temporelle de la MOP associée au maximum de Chl a de subsurface ?
Quelle est la NCP associée au maximum de Chl a de subsurface dans la zone peu éclairée située sous le 1% de lumière ?

2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

Moyens disponibles

Localisation de la campagne OUTPACE (mars/avril 2015)

Bathymétrie (m)



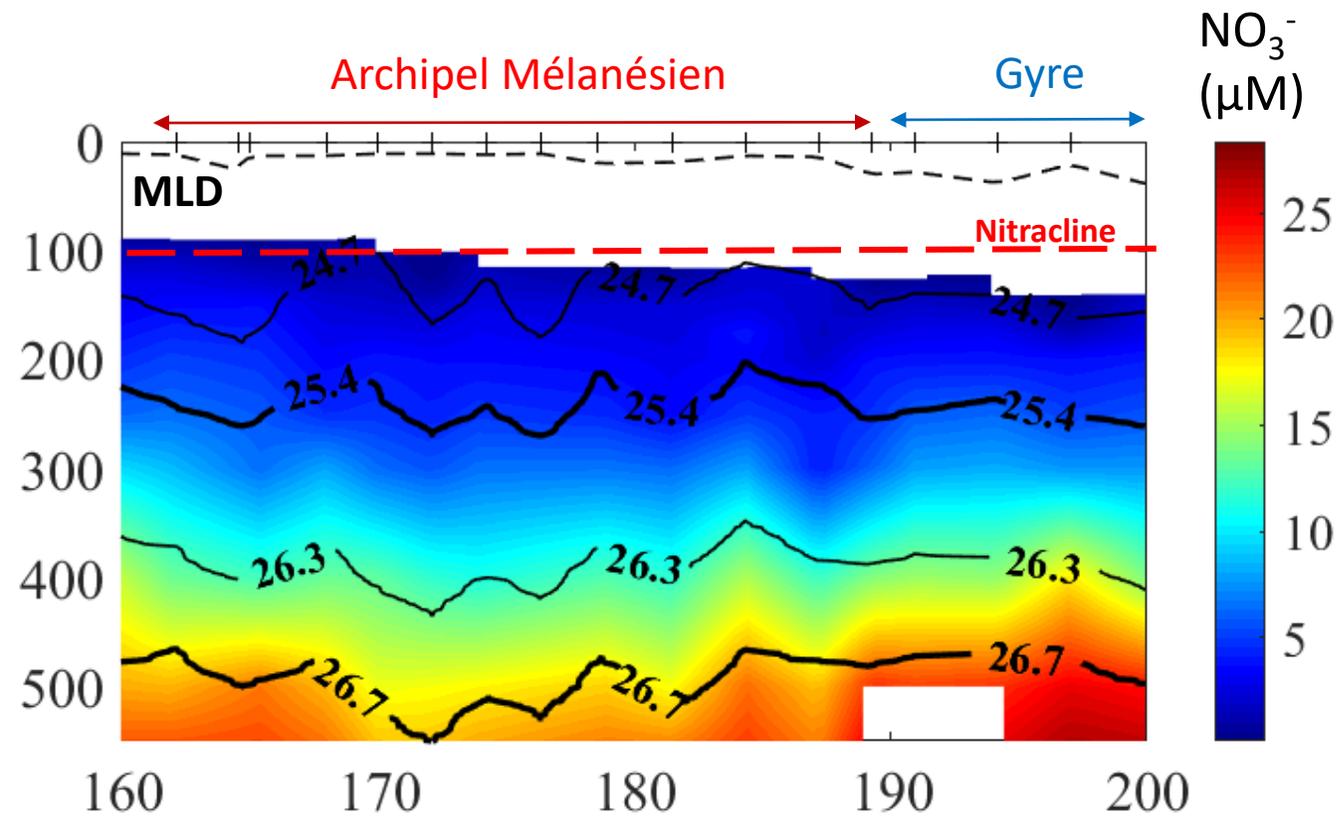
- 18 stations visitées
- Données disponibles : CTD, NO_3^- , PO_4^{3-} , COP, NOP, POP, O_2 , taux de fixation de N_2

- Analyses chimiques COP et NOP, méthode CHN
- Participation analyse chimique NO_3^- , méthode oxydation humide
- Traitement et analyse des données de la campagne OUTPACE

Travail réalisé pendant la thèse

2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

[NO₃⁻] mesurées pendant la campagne OUTPACE

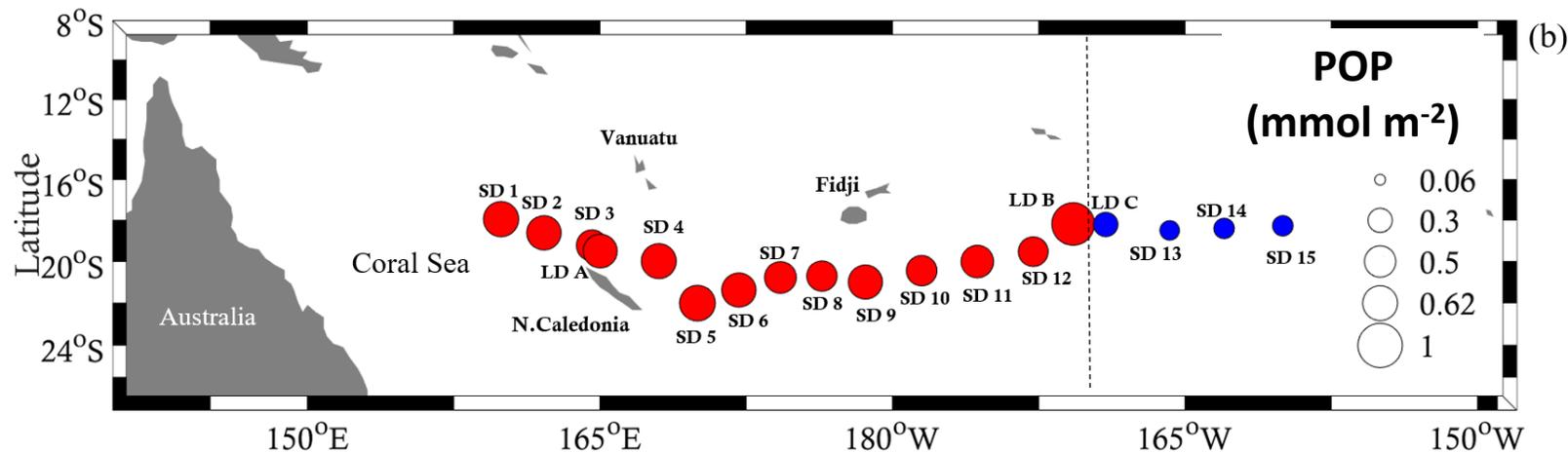
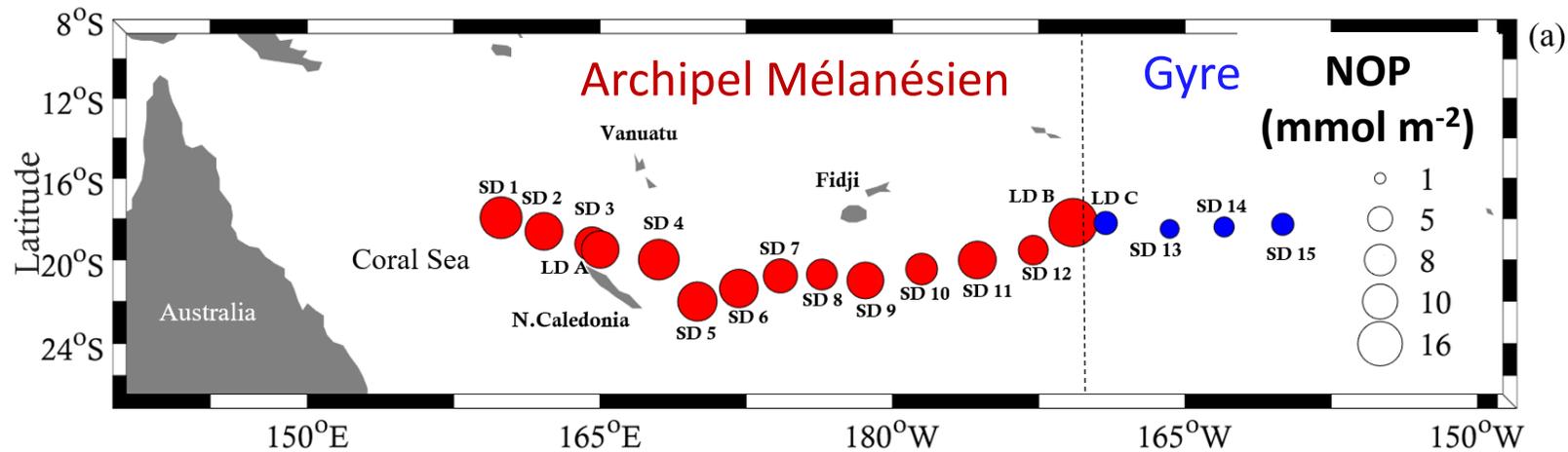


- [NO₃⁻] non quantifiables dans les 100^{er} m
- MLD = 25 m
- Nitracline = 90 m pendant la campagne
(Moutin et al., 2018)
- Pas d'apport verticaux de NO₃ par des processus de méso échelle (de Verneil et al., 2017)
- Dépôts atmosphériques de N négligeables
(Caffin et al., 2018)

Apports de NO₃⁻ par mélange vertical, diffusion, atmosphériques, négligeables pendant la campagne

2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

Stocks intégrés de **NOP** et **POP** dans la couche de mélange (~25 m)



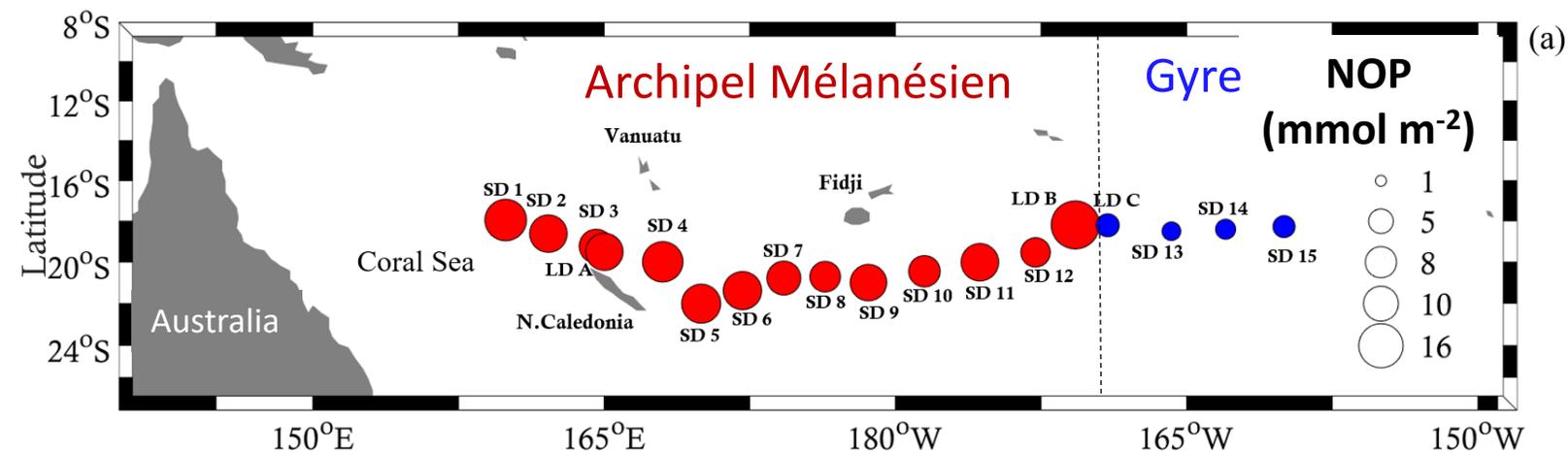
➤ $[\text{NO}_3^-] < \text{LQ}$ mais des stocks de MOP équivalent aux régions productives équatoriales riches en éléments nutritifs !

Archipel
NOP = $11 \pm 4 \text{ mmol m}^{-2}$

Gyre
NOP = $3 \pm 1 \text{ mmol m}^{-2}$

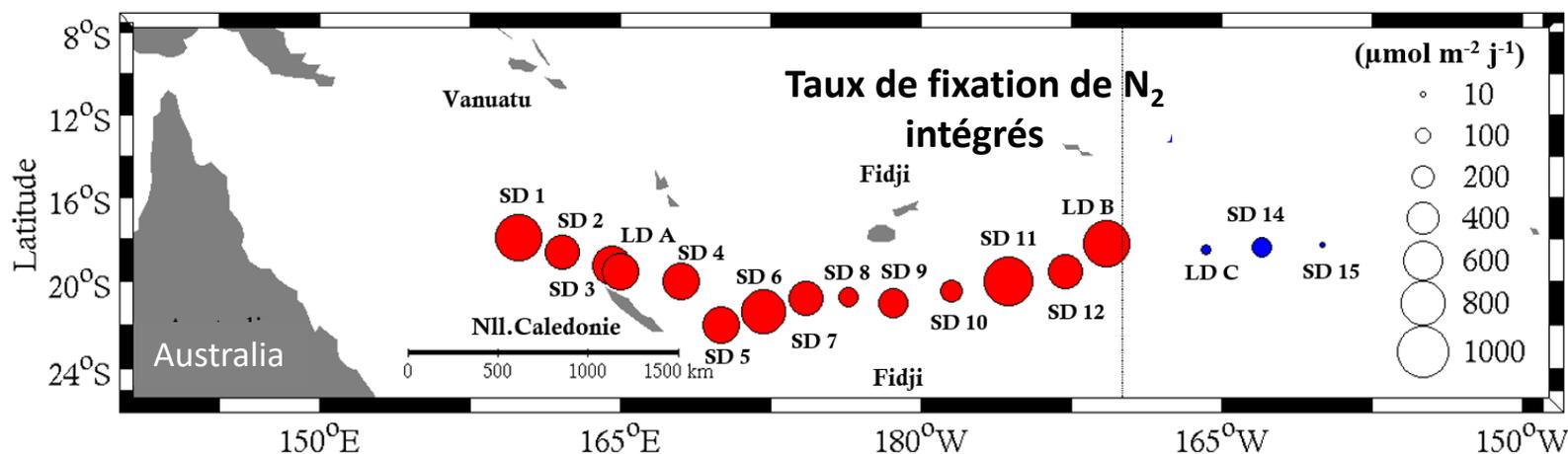
2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

Stocks intégrés de **NOP** et des **taux de fixation de N₂** dans la couche de mélange (~25 m)



- $[\text{NO}_3^-] < \text{LQ}$ mais des stocks de MOP équivalent aux régions productives équatoriales riches en éléments nutritifs !

Quelle est l'origine de cette augmentation de MOP ?



- Fixation de N₂ records dans l'Archipel Mélanésien ($100\text{-}840 \mu\text{mol N m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

- Valeurs très faibles dans les eaux du Gyre ($5\text{-}73 \mu\text{mol N m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

Liens entre les concentrations en NOP (POP) et la fixation de N₂ ($R^2=0,70$; $p<0,001$)

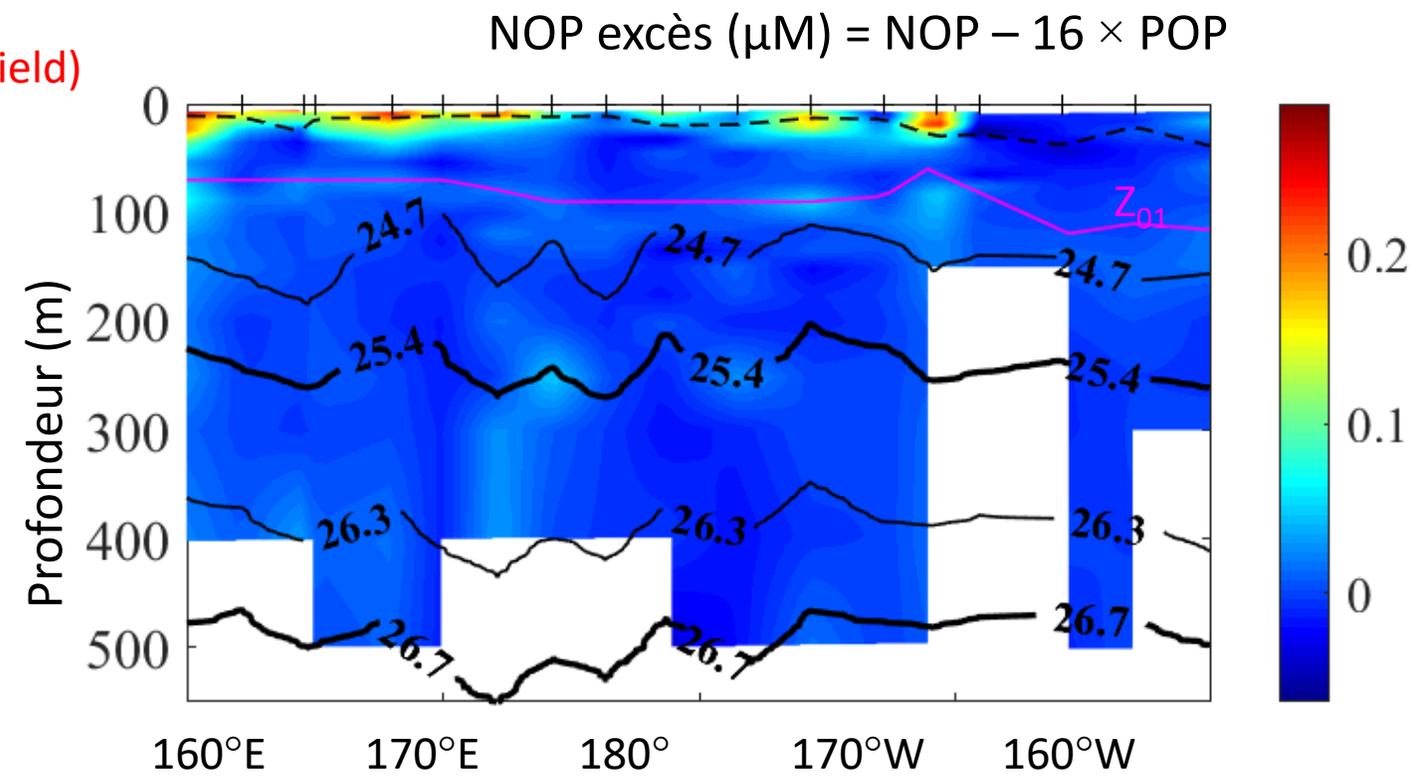
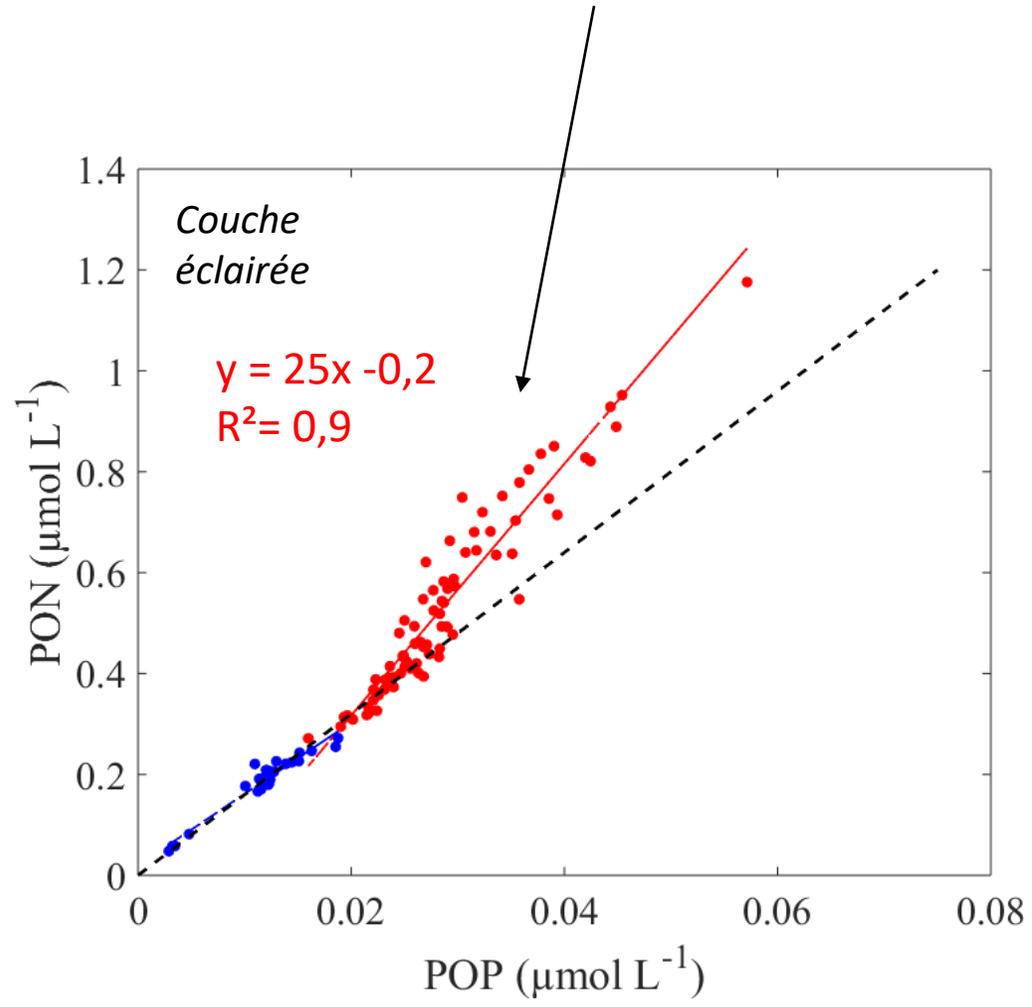
N₂ fixation = principale source possible de N capable de soutenir la production de MOP (pendant la campagne)

Moutin et al. (2018)

2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

Impacts d'une intense fixation de N₂ sur les propriétés de la MOP ?

Excès de NOP par rapport au POP (en considérant Redfield)
dans les eaux de surface de l'Archipel Mélanésien



NOP excès vs N₂ fixation

- $R^2 = 0,86$, $p < 0,001$, Spearman's correlation
- Excès de N provient de l'apport de N nouveau due à l'activité diazotrophe

2-1 Dynamique spatiale de la MOP dans les eaux de surface du WTSP

En résumé

Dans le WTSP

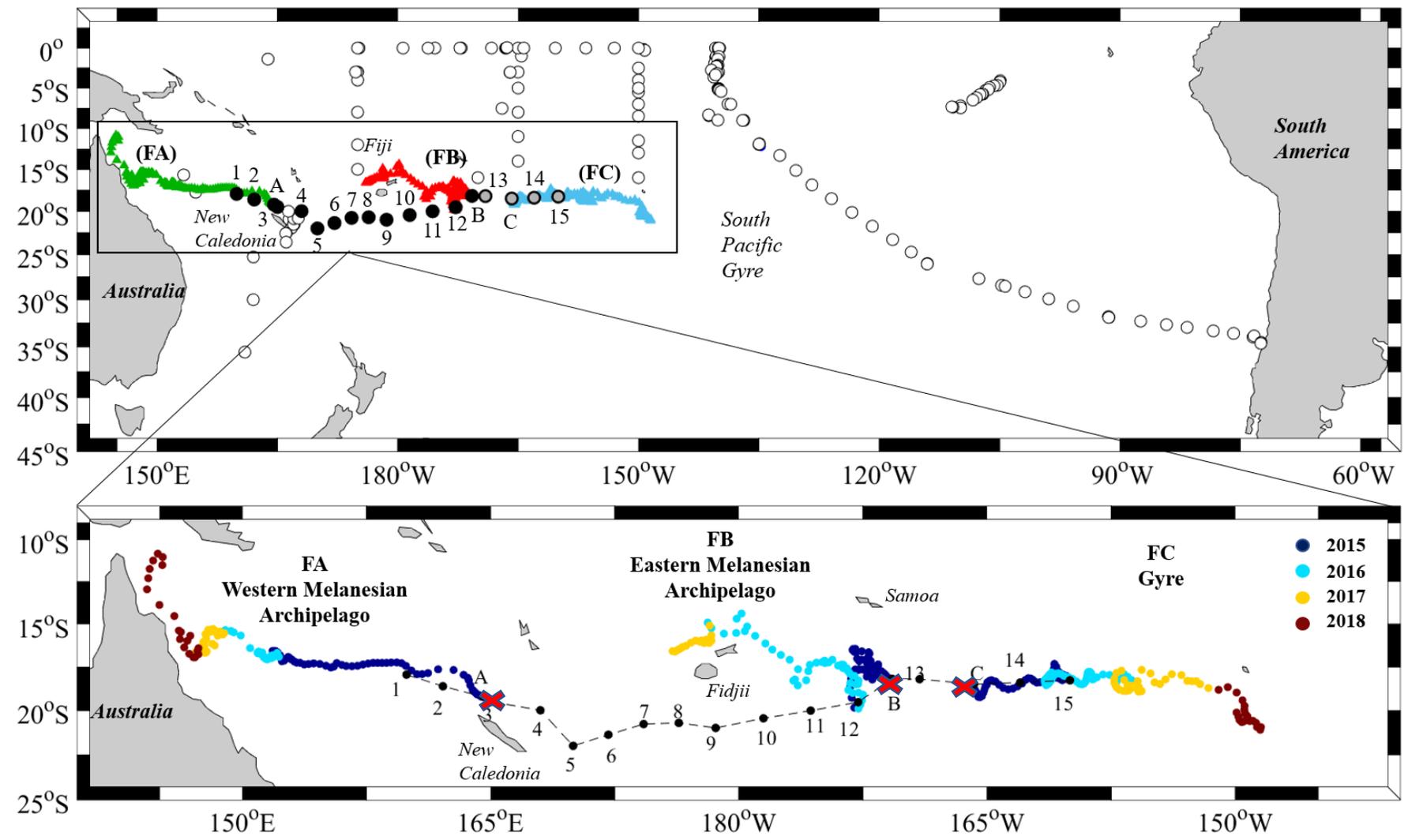
- **Fortes [MOP]** malgré des $[\text{NO}_3^-]$ extrêmement faibles
- **Même ordre de grandeur que dans la région équatoriale** ou dans les **régions subpolaires des latitudes nord**
- Apports de NO_3^- par les processus physiques (mélange, méso-échelle...) négligeables
- [MOP] **significativement corrélées** avec les taux de fixation de N_2 ($R^2=0,70$, $p<0,001$)
- Production de MOP **enrichie en azote** par rapport à la stœchiométrie de Redfield
- Lien étroit entre l'excès de NOP et les taux de fixation de N_2 ($R^2 = 0,86$, $p<0,001$)

La fixation de N_2 = seule source possible d'azote capable de soutenir la production de MOP enrichie en azote (à l'échelle de temps de la campagne OUTPACE)

Et sur une échelle de temps saisonnière ?

Moyens disponibles

Trajectoire des flotteurs (+ localisation des données de NOP dans le Pacifique sud, *Martiny et al., 2014*)



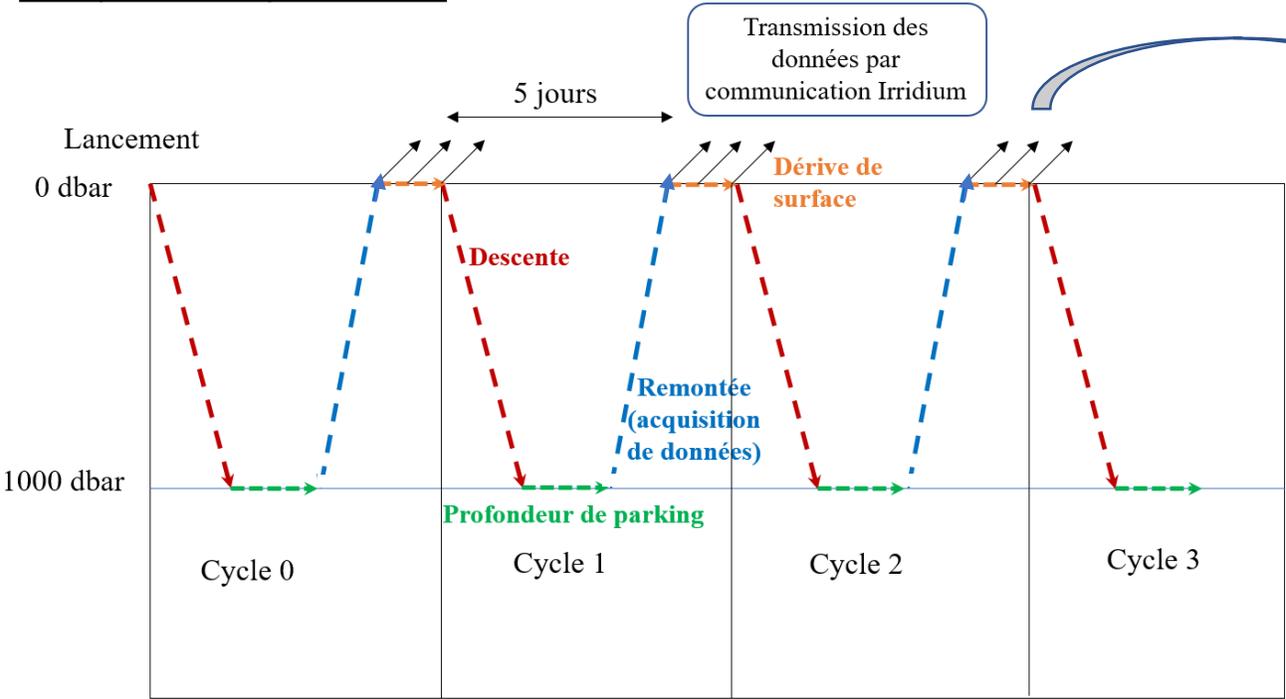
3 flotteurs BGC-Argo

- LDA → flotteur F_A (vert)
- LDB → flotteur F_B (rouge)
- LDC → flotteur F_C (bleu)

~ 3 années de mesures
Mars 2015 → Juillet 2018

✗ = 1^{er} profils

Moyens disponibles



Données *in situ* de la campagne OUTPACE (mars/avril 2015) combinées aux données de flotteurs BGC-Argo

- T, S -----> MLD, masse d'eau
- Chl α -----> Proxy biomasse phytoplanctonique
- b_{bp} 700 -----> Proxy optique de la MOP
- O₂ -----> Calcul de la NCP
- PAR -----> Couche éclairée

Représentation schématique du fonctionnement des 3 flotteurs déployés lors de la campagne OUTPACE

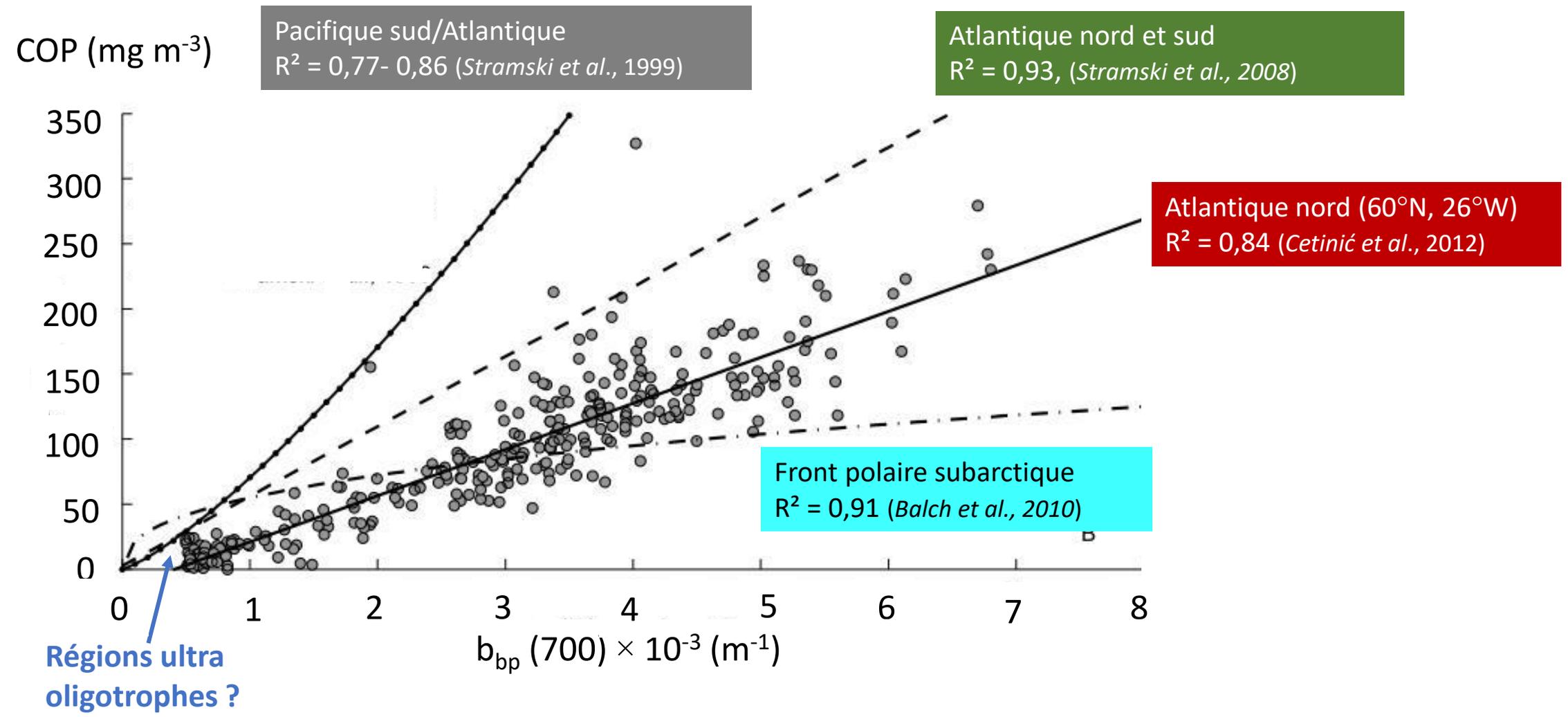
- Fichiers bruts netCDF → Script MATLAB
- Contrôle qualité des données protocole Argo
- Ajustement des mesures de fluorescence de Chl α
- Nouveaux proxy optiques de la MOP à partir du b_{bp}

Travail réalisé pendant la thèse

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP

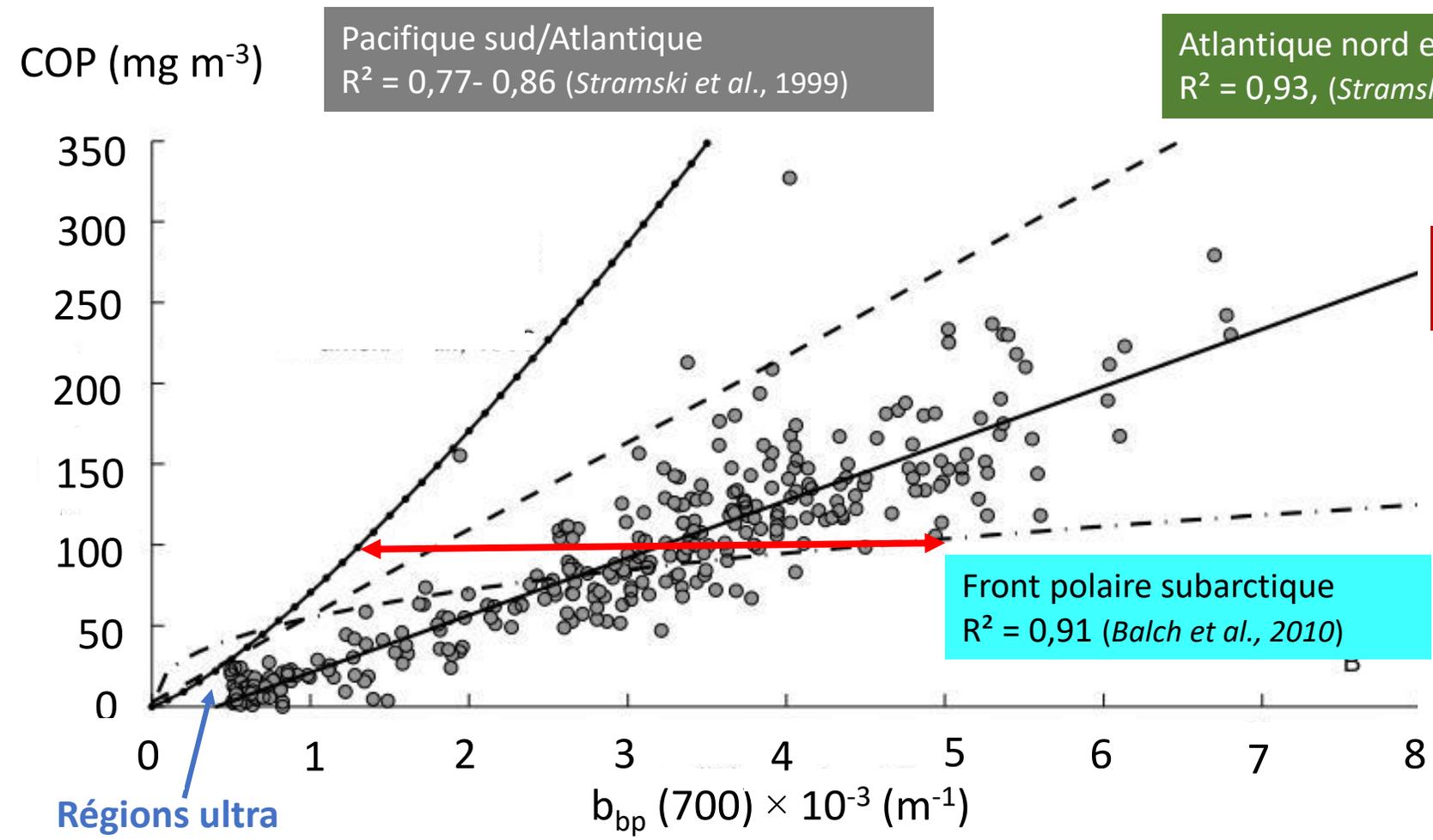
Relation b_{bp} vs COP dans la littérature
(Modifiée de *Cetinić et al.*, 2012)



2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

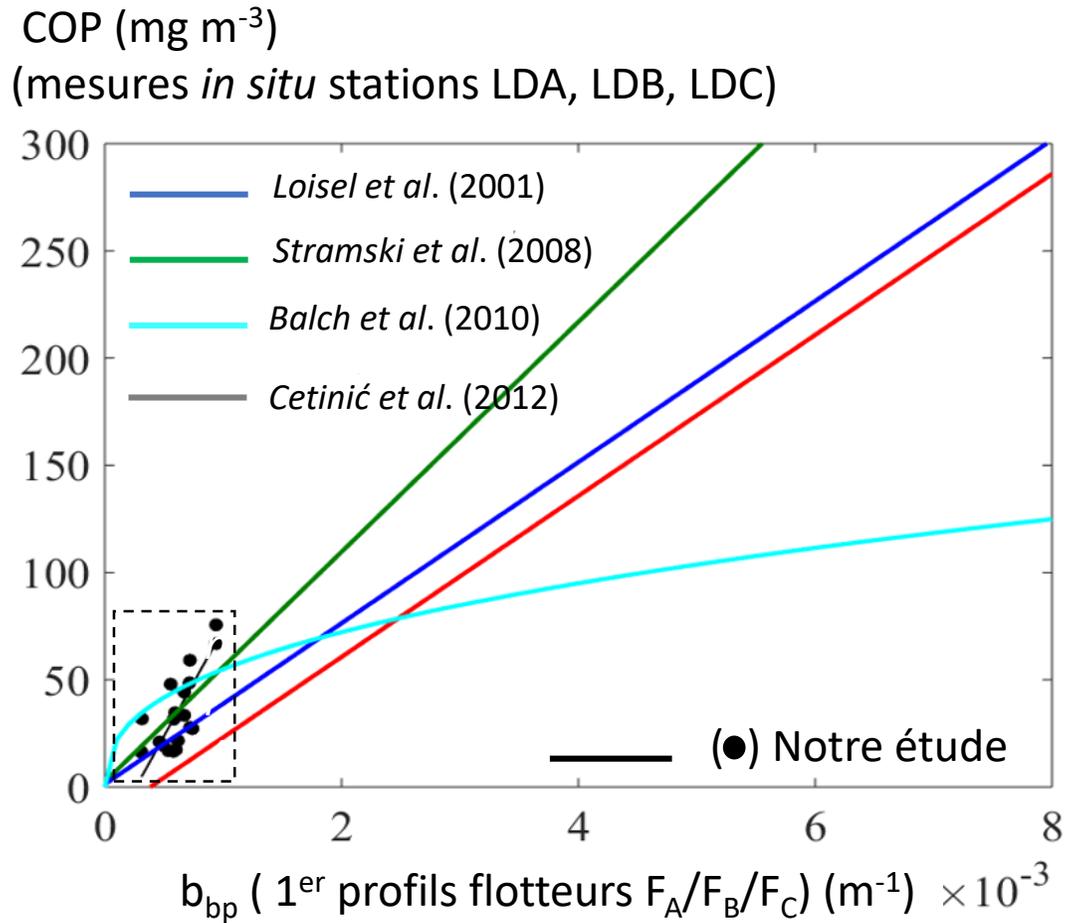
1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP

Relation b_{bp} vs COP dans la littérature
(Modifiée de *Cetinić et al.*, 2012)



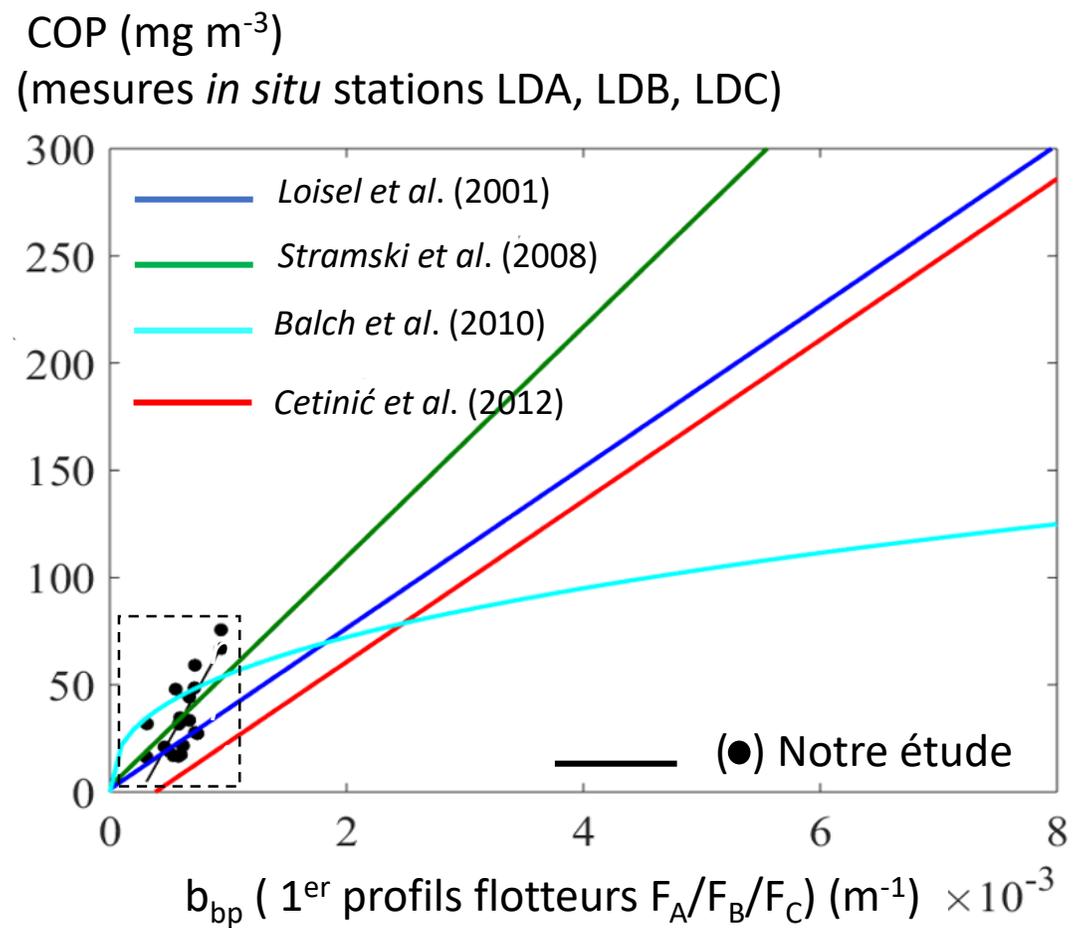
Forte dispersion en fonction de la région considérée
Par exemple, $[COP] = 100 mg m^{-3}$,
 $b_{bp} = 1 \text{ à } 5 \times 10^{-3} m^{-1}$

1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP

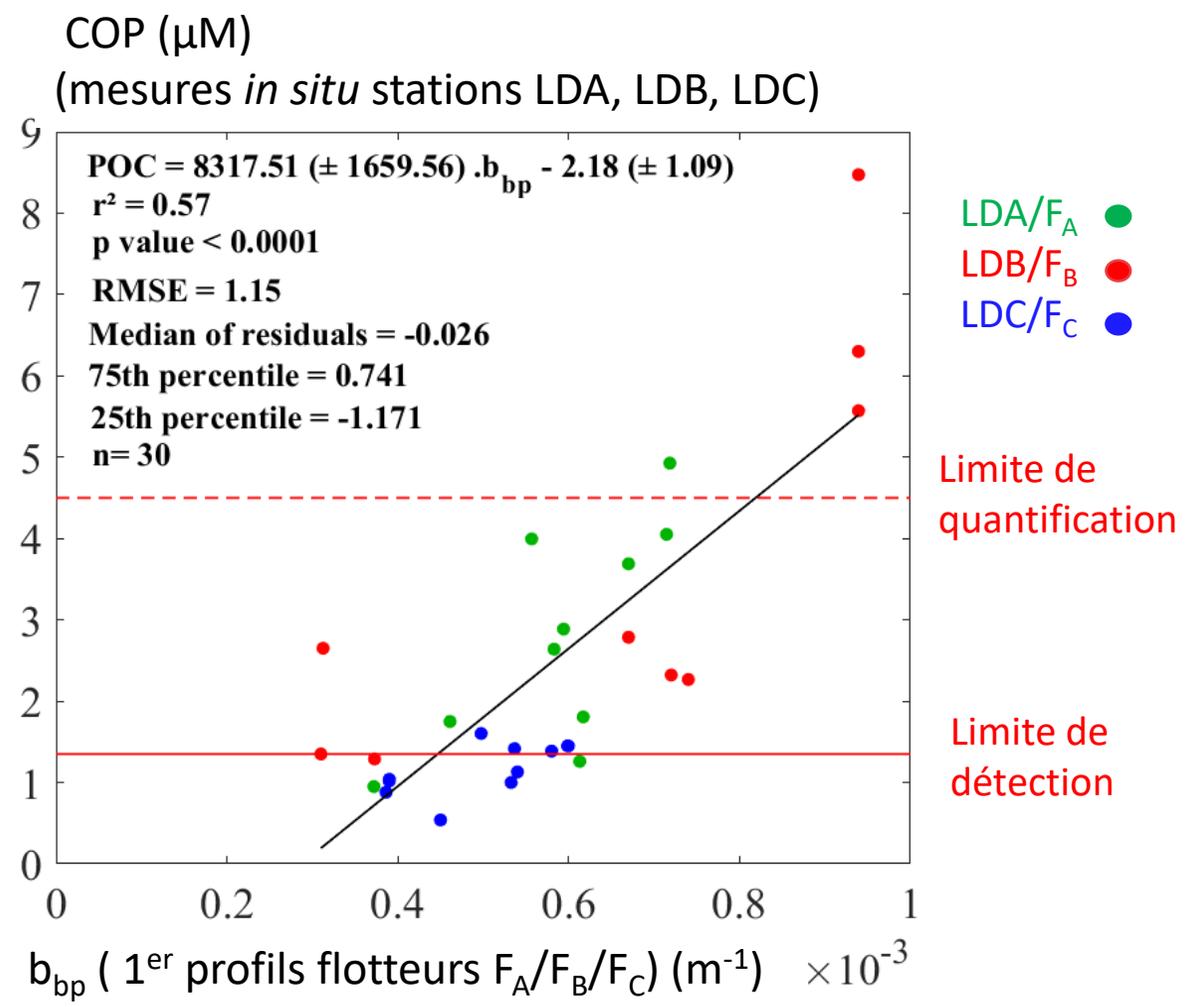


➤ Valeurs maximales de b_{bp} et de COP très faibles

1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



➤ Valeurs maximales de b_{bp} et de COP très faibles

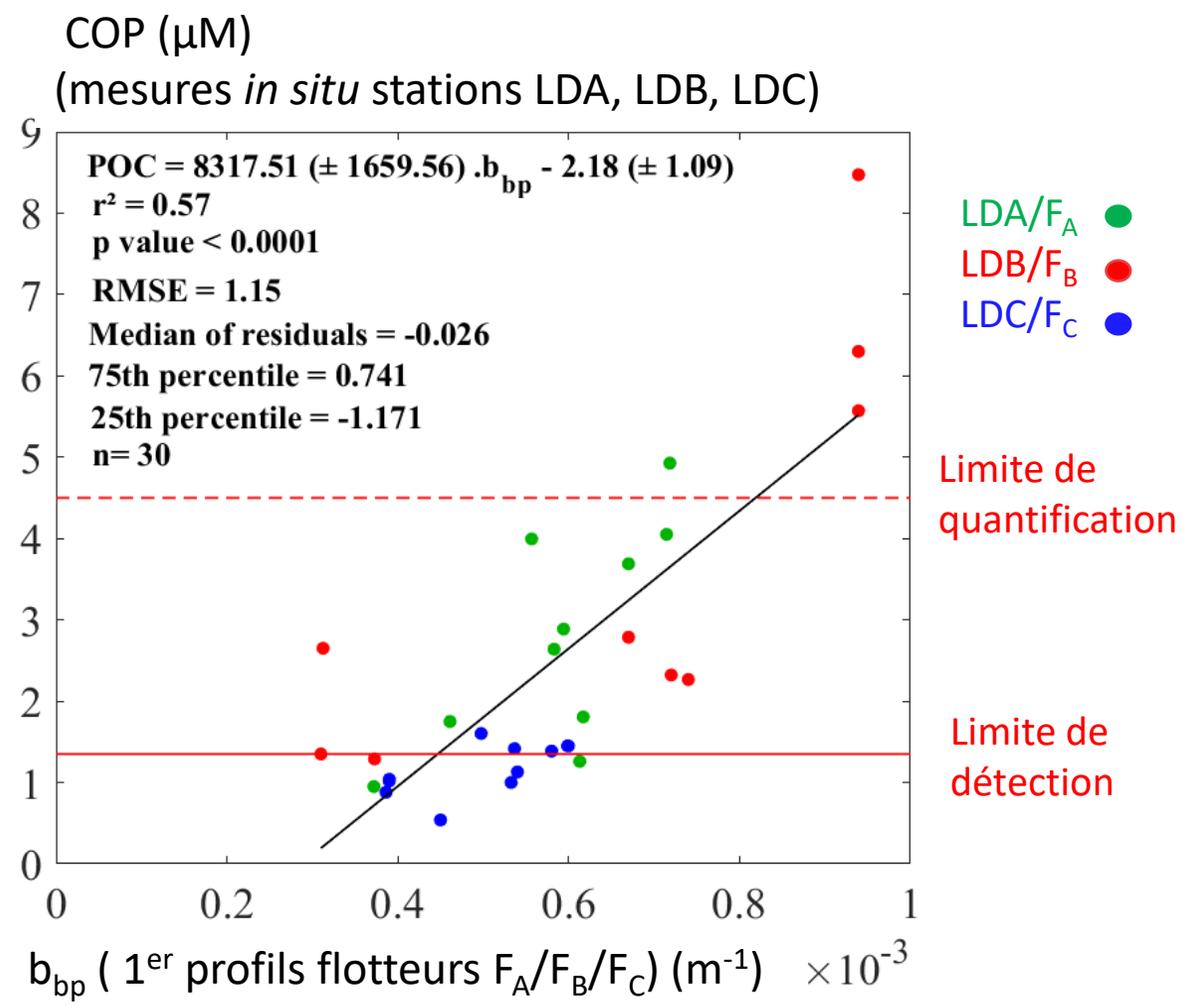
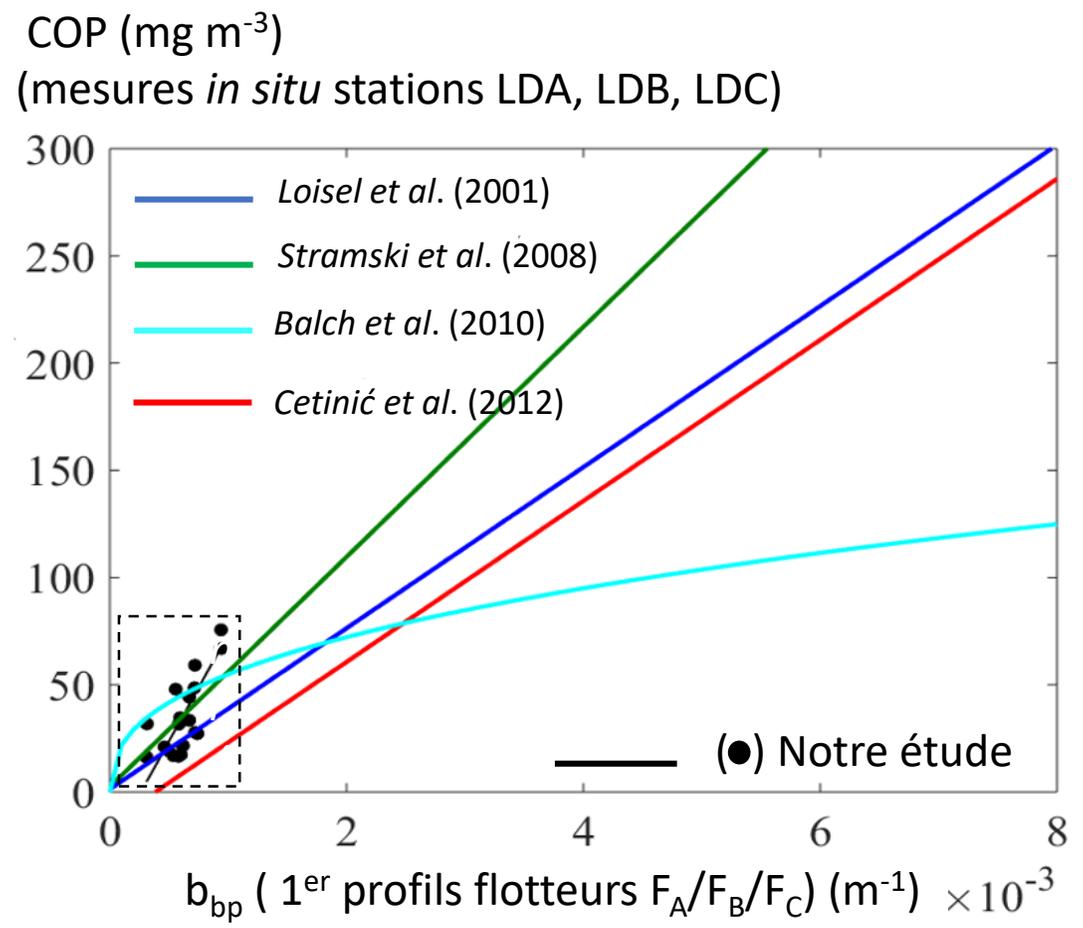


- Nombreuses données sous la LQ
- Forte dispersion
- Relation statistique moyenne



Besoin d'une alternative !

1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



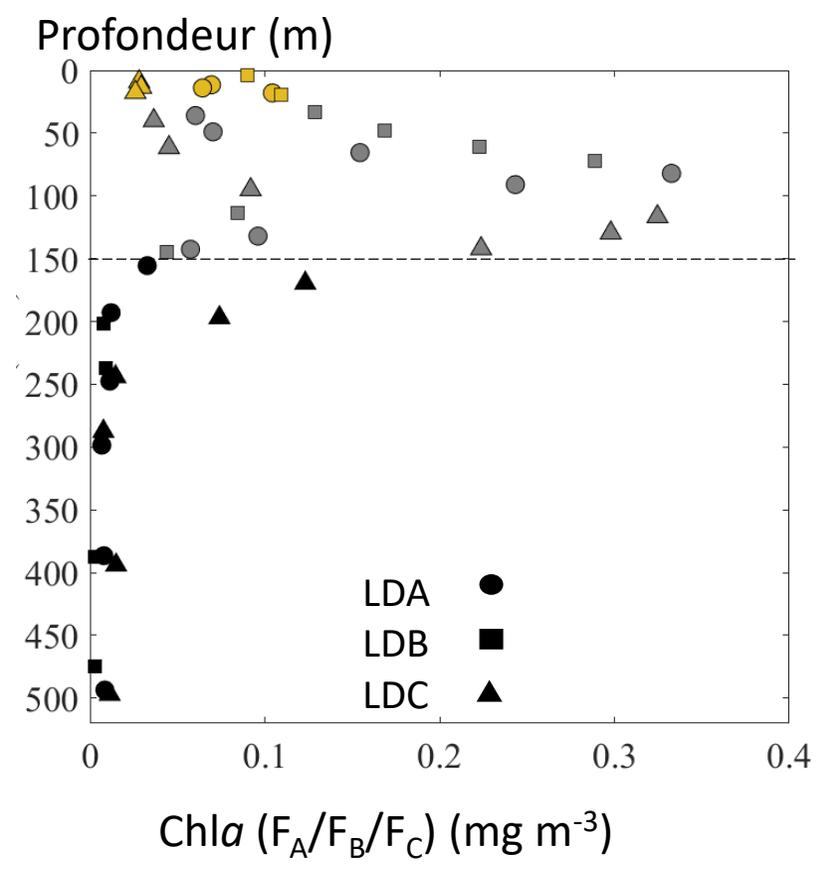
NOP et POP, utilisation de la méthode d'oxydation humide

- Besoin de petits volumes filtrés (1 L)
- Moins couteuse en temps
- Moins de contaminations
- Adaptée aux régions oligotrophes

Proxys optiques du NOP et du POP ?

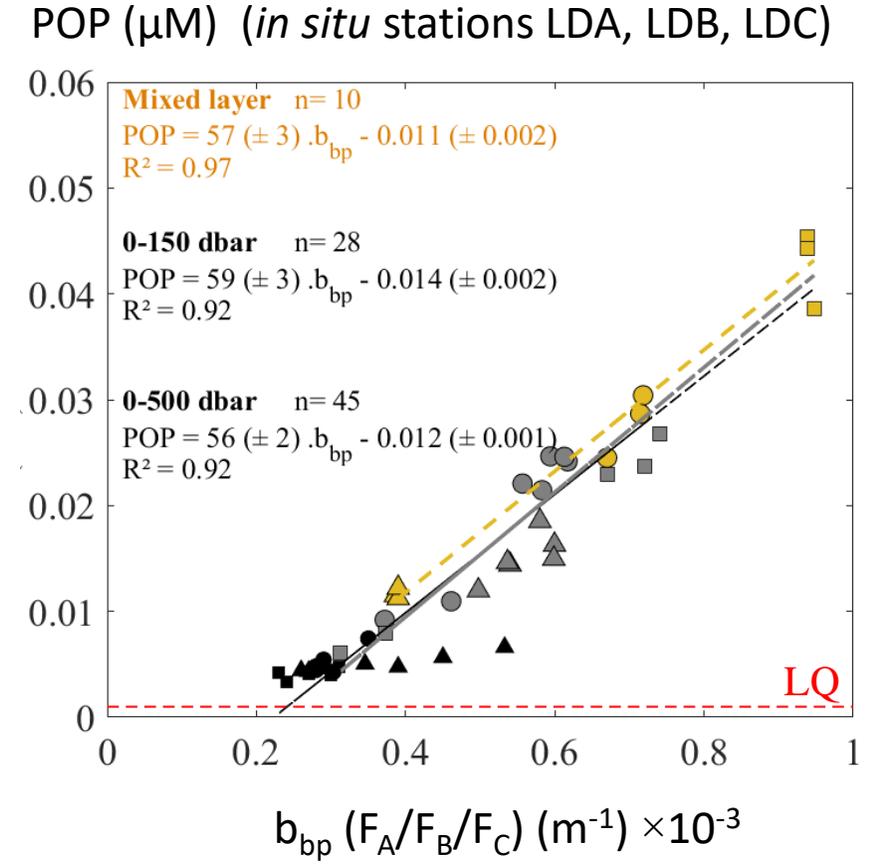
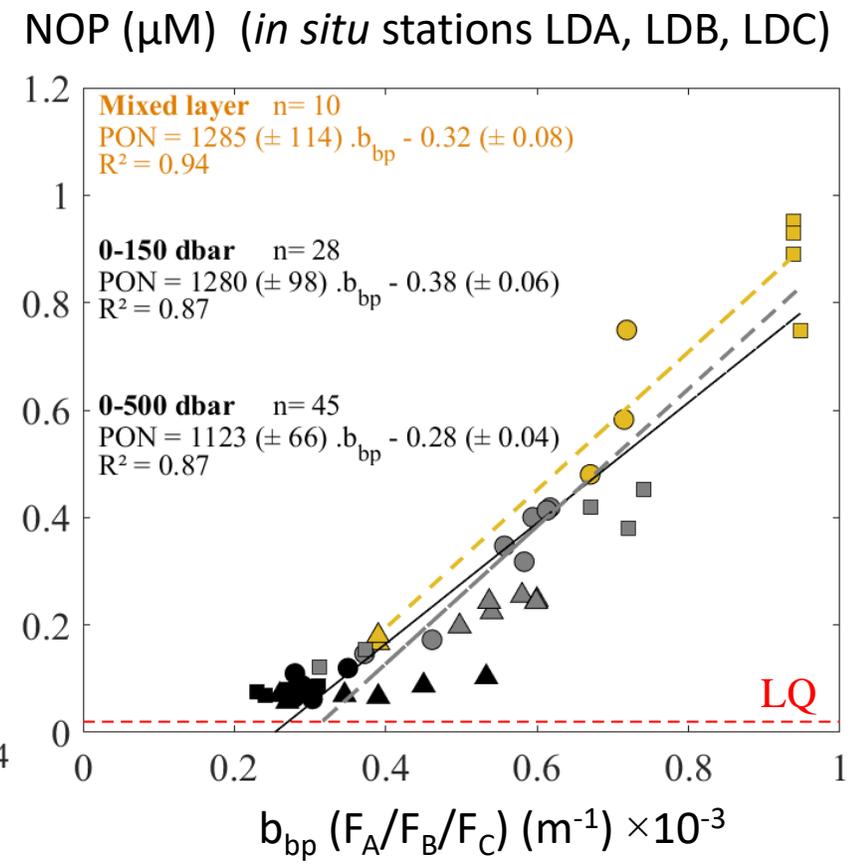
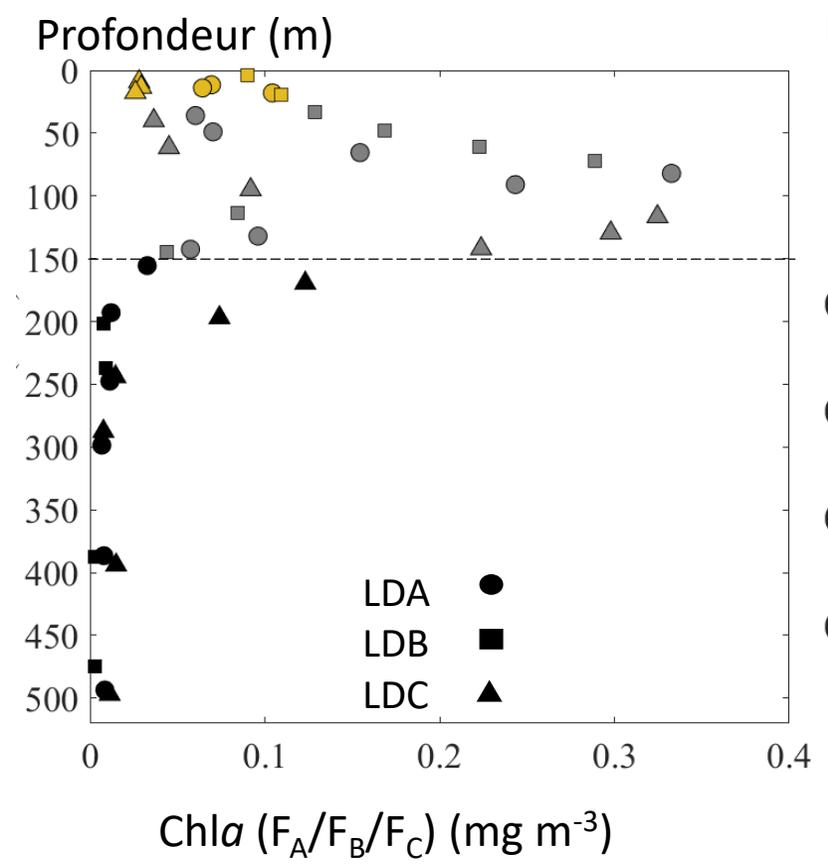


2^{em} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



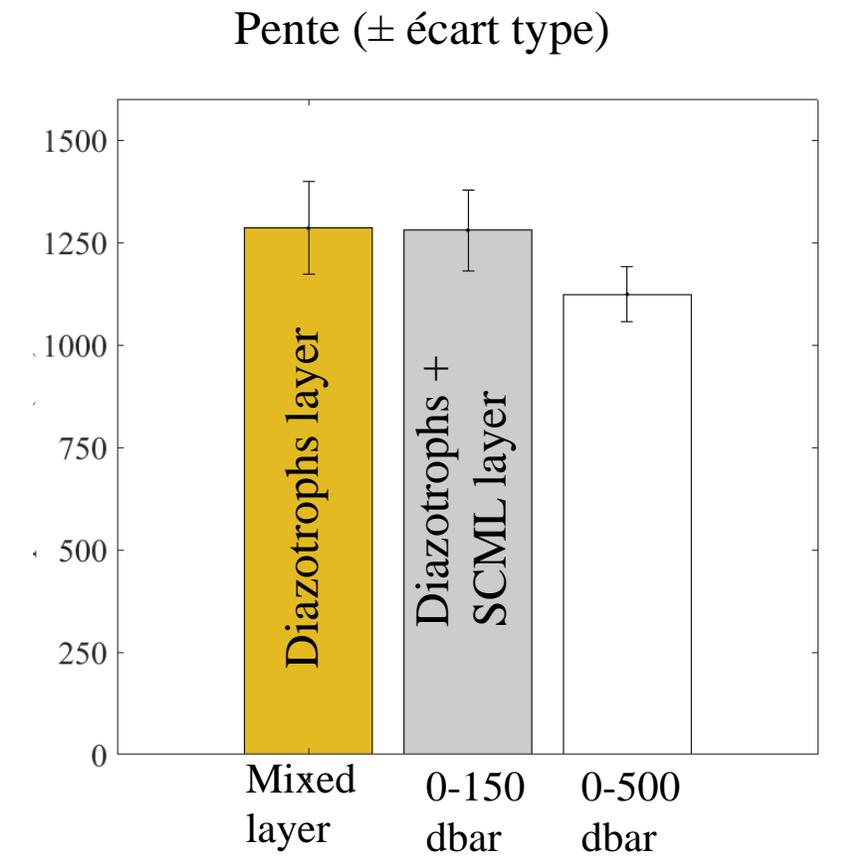
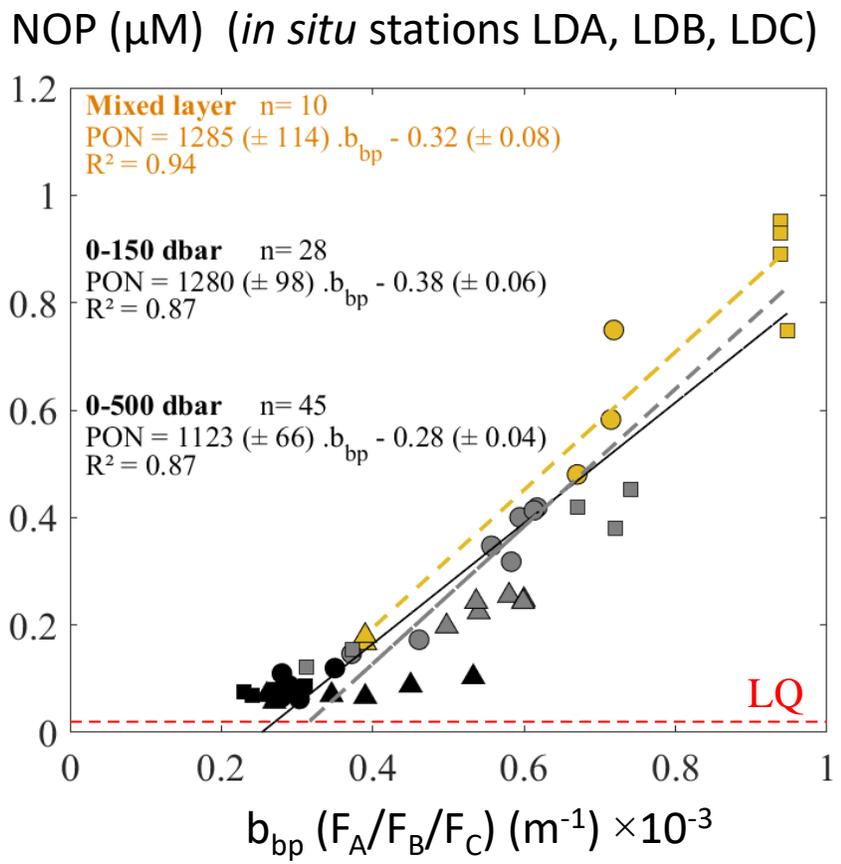
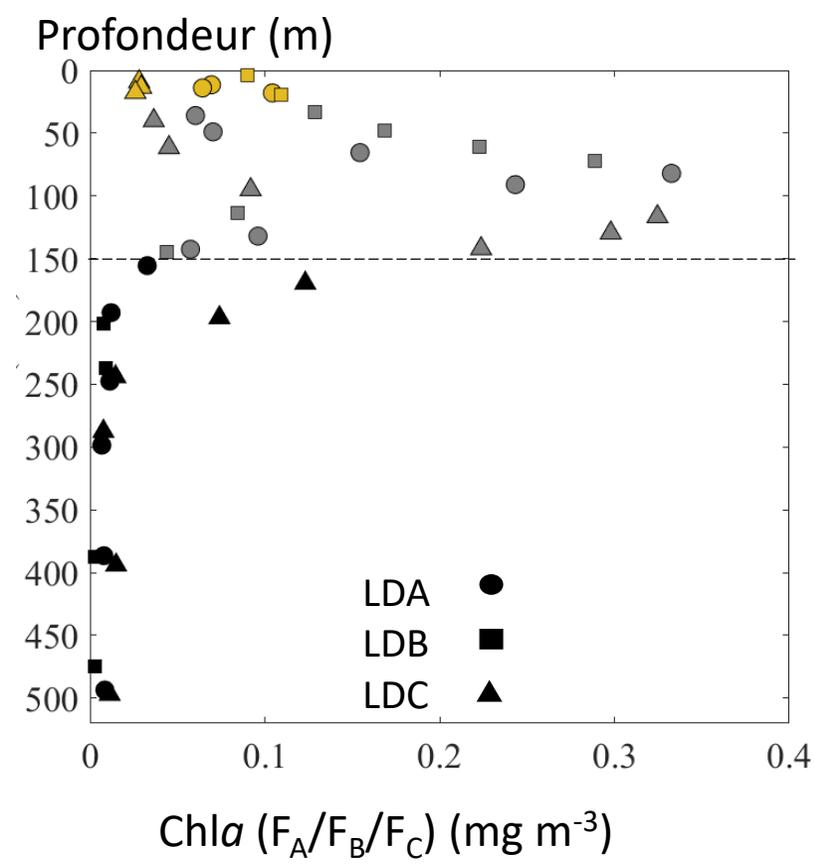
2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

2^{em} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

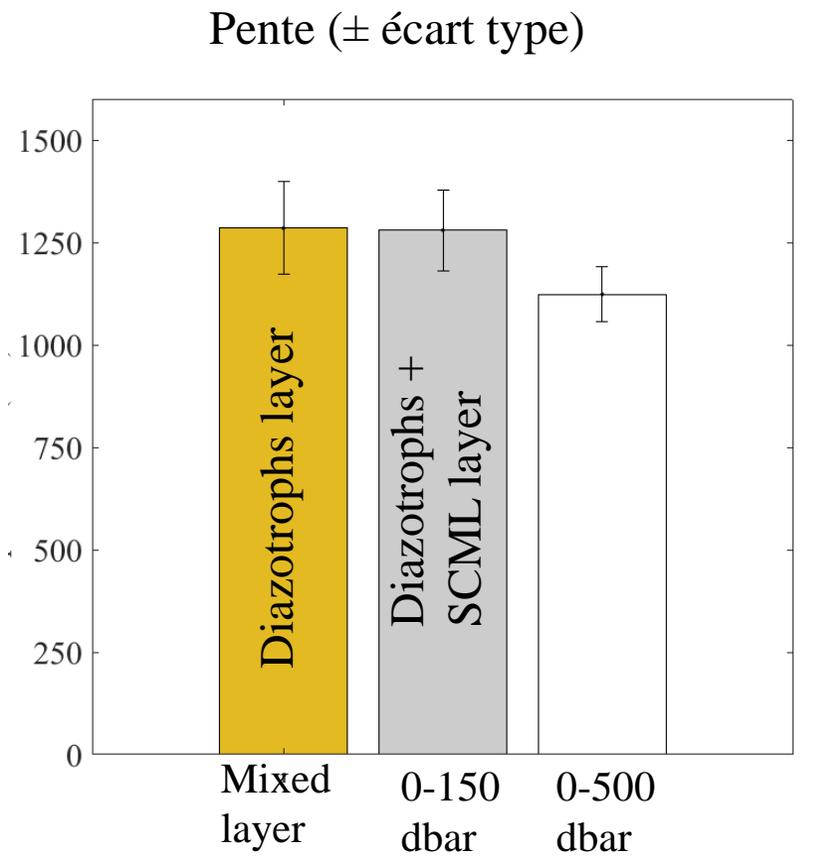
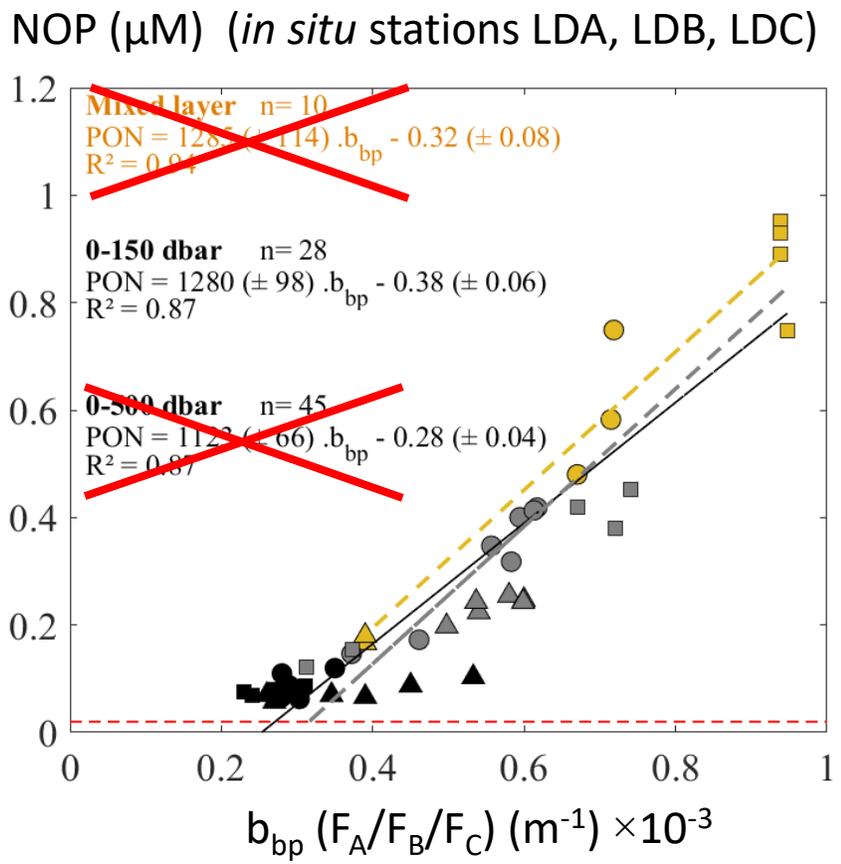
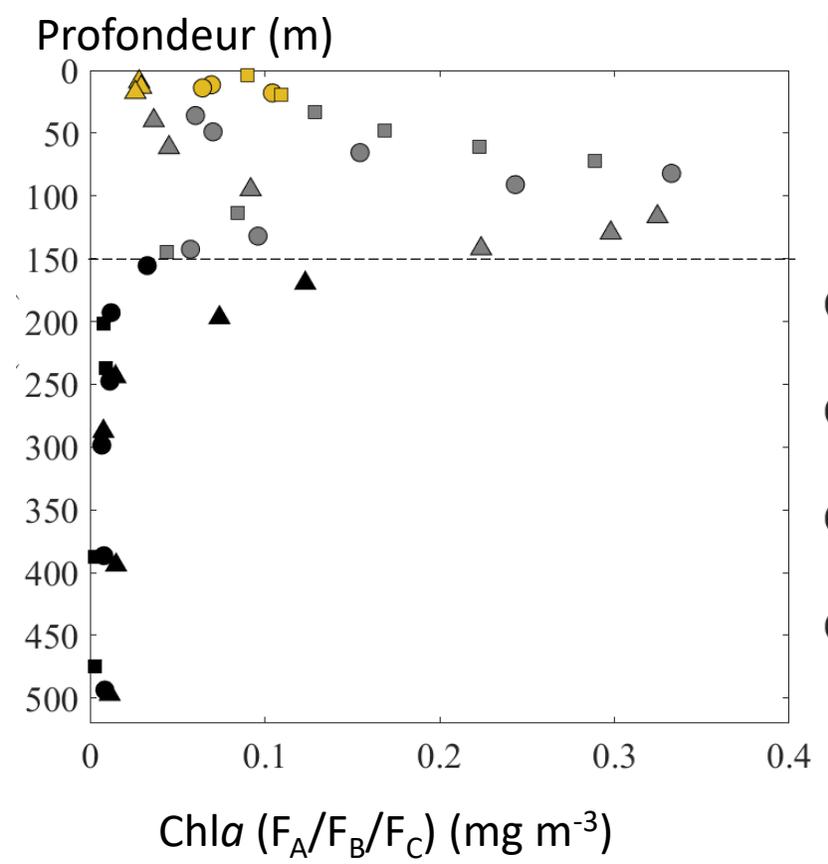
2^{em} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



- Pente dans la couche de mélange = pente dans les eaux de subsurface
- Changement de biomasse est l'effet dominant entre 0 et 150 m

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

2^{em} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP

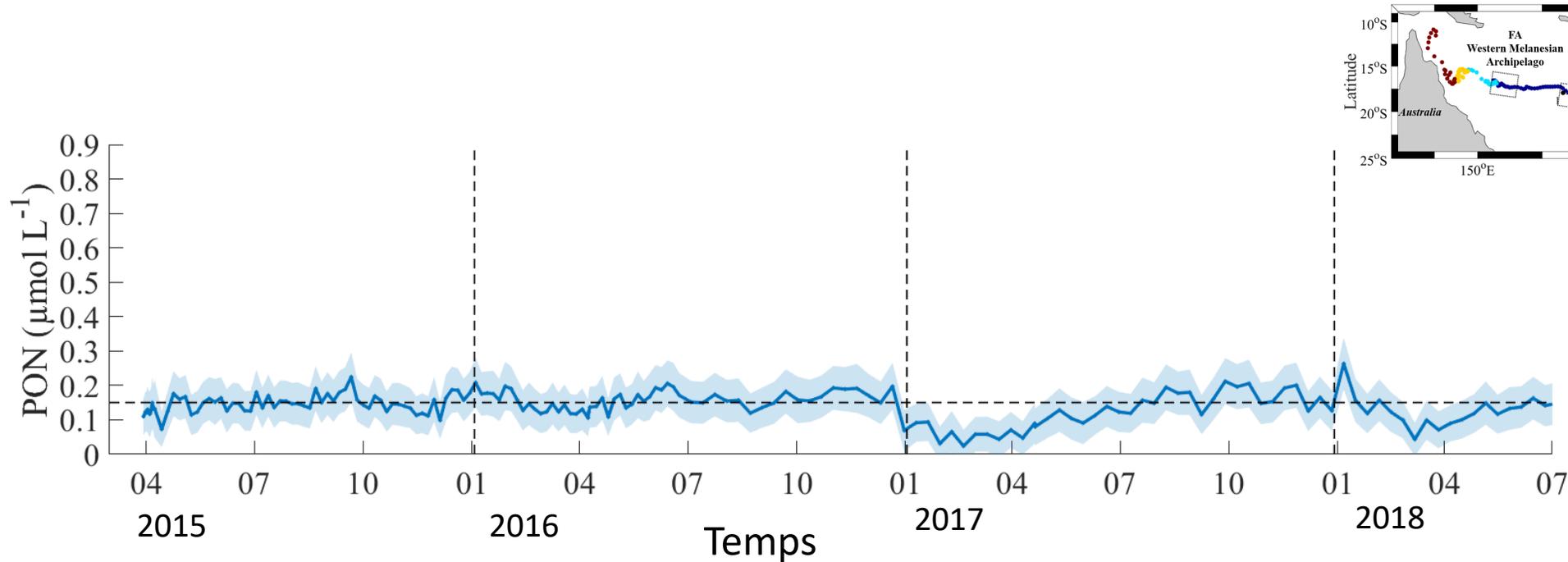


- Pente dans la couche de mélange = pente dans les eaux de subsurface
- Changement de biomasse est l'effet dominant entre 0 et 150 m

➤ Proxy optique de la biomasse organique particulaire entre 0 et 150 m: $PON^{opt} = 1280 \times b_{bp} - 0,38$

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans les eaux du gyre

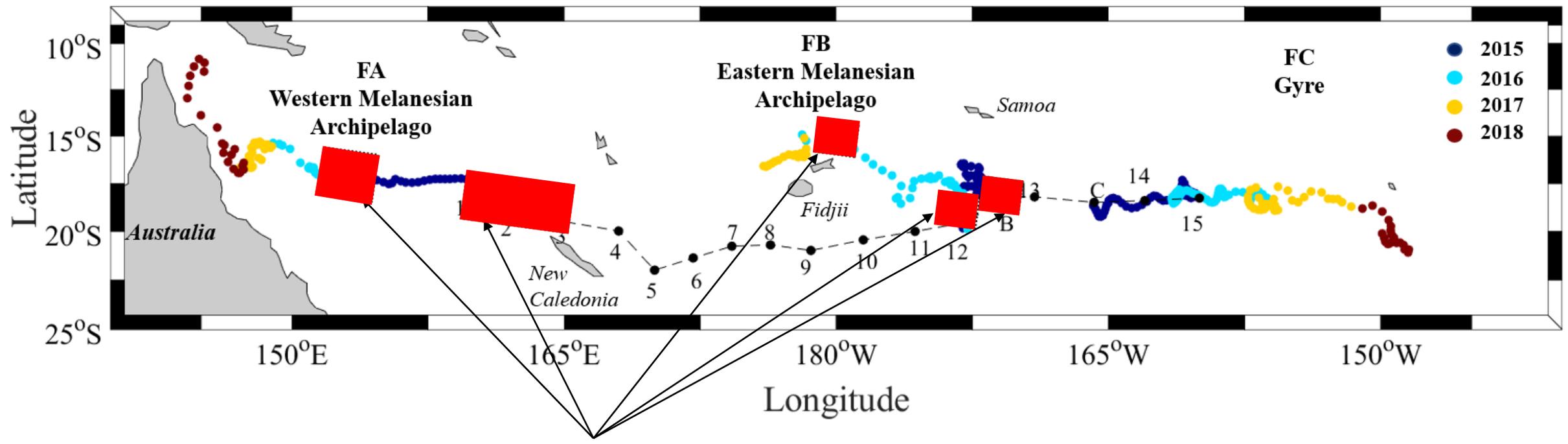


Concentrations en PON^{opt} dans la couche de mélange des eaux du gyre (Flotteur F_C)

PON^{opt} remarquablement stable et faible (< 0,20 µM)

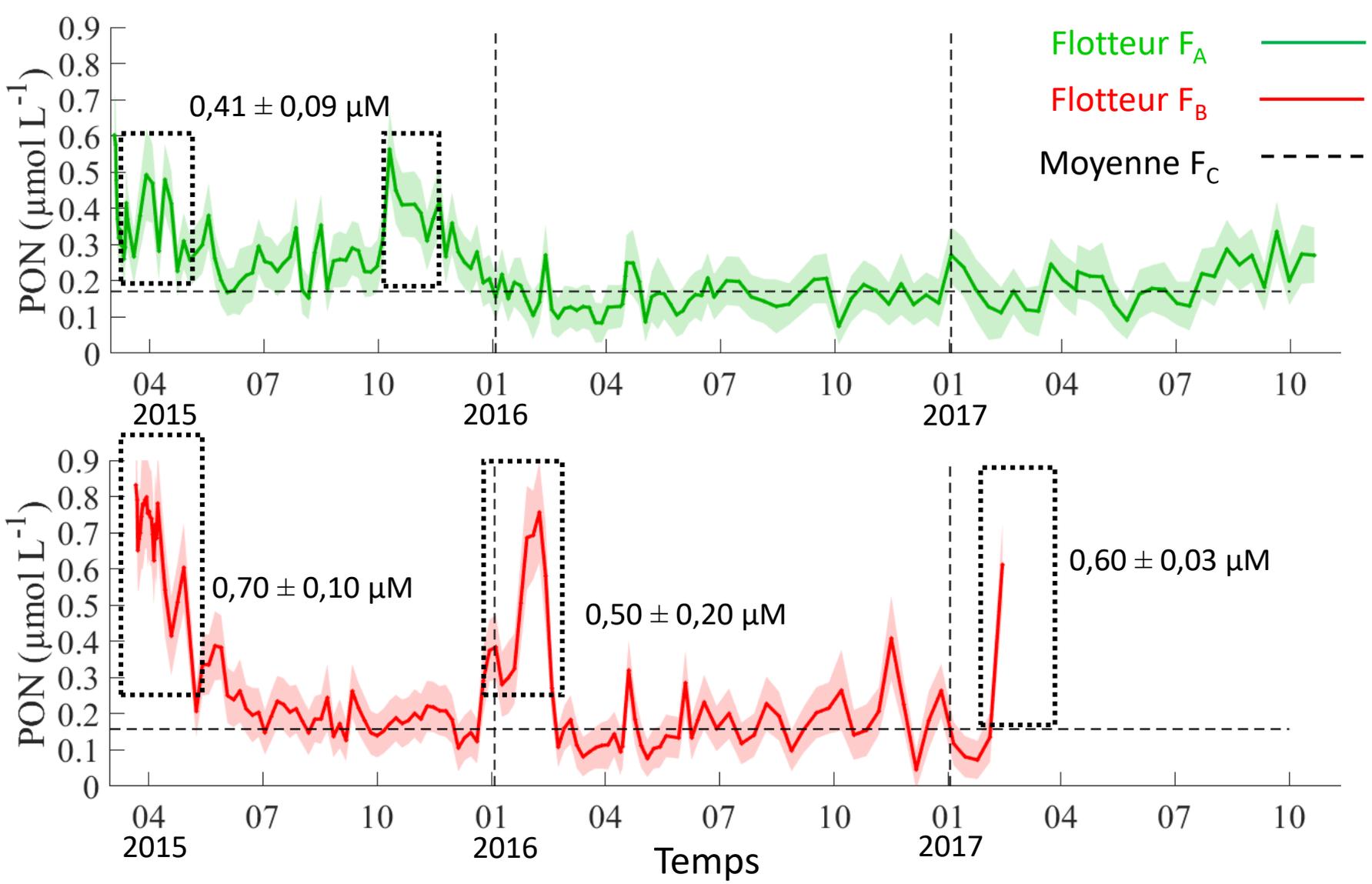
- Équilibre entre production et reminéralisation/export
- Production phytoplanktonique (non diazotrophe) limitée par la disponibilité en N (*Raimbault et al., 2008*)
- Pas de bloom de diazotrophe → limitation par le fer (*Blain et al., 2008; Moutin et al., 2018*)

Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans l'archipel Mélanésien



Augmentation de PON^{opt} dans l'Archipel Mélanésien

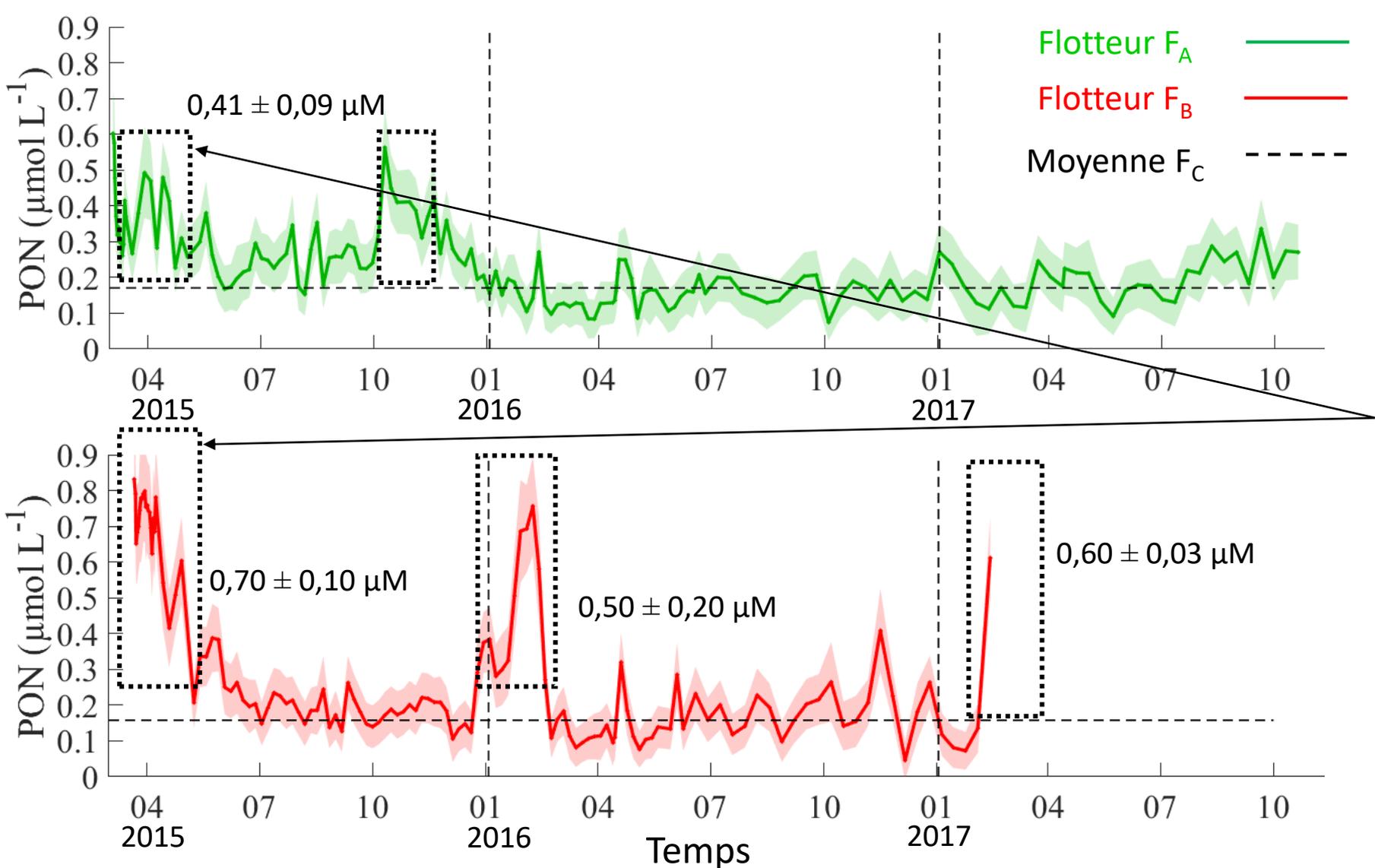
Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans l'archipel Mélanésien



Augmentation de PON^{opt}
d'un facteur 2 à 5 en
période estivale stratifiée

Origine de ces augmentations ?

Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans l'archipel Mélanésien



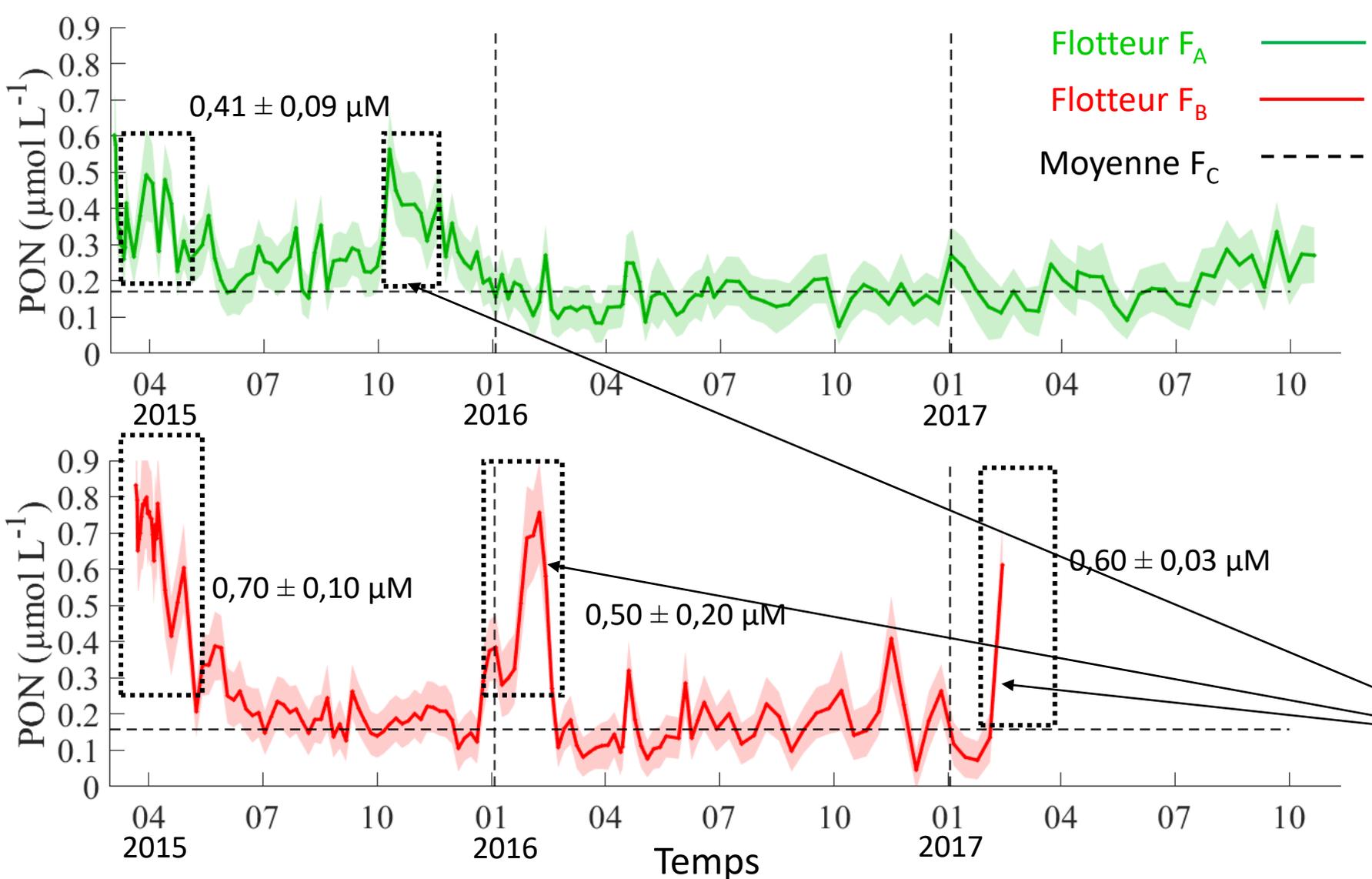
Augmentation de PON^{opt}
d'un facteur 2 à 5 en
période estivale stratifiée

Origine de ces augmentations ?

Deux premiers blooms

➤ Blooms de diazotrophes observés pendant la campagne

Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans l'archipel Mélanésien



Augmentation de PON^{opt}
d'un facteur 2 à 5 en
période estivale stratifiée

Origine de ces augmentations ?

Blooms suivant
Diazotrophie ?

Comment expliquer ces augmentations de PON^{opt} en période stratifiée ?

- **Apports atmosphériques et fluviaux de N ou de particules ?** (*Hansell et al., 2000 ; Jickells et al., 2017*)
- **Mélange vertical : approfondissement de la MLD qui atteint la nitracine ?**
- **Processus méso-échelle/ Ondes internes : déplacement de la nitracine ?** (*McGillicuddy et al., 2007*)
- **N_2 fixation : apport de N nouveau ?**



Peter Falk

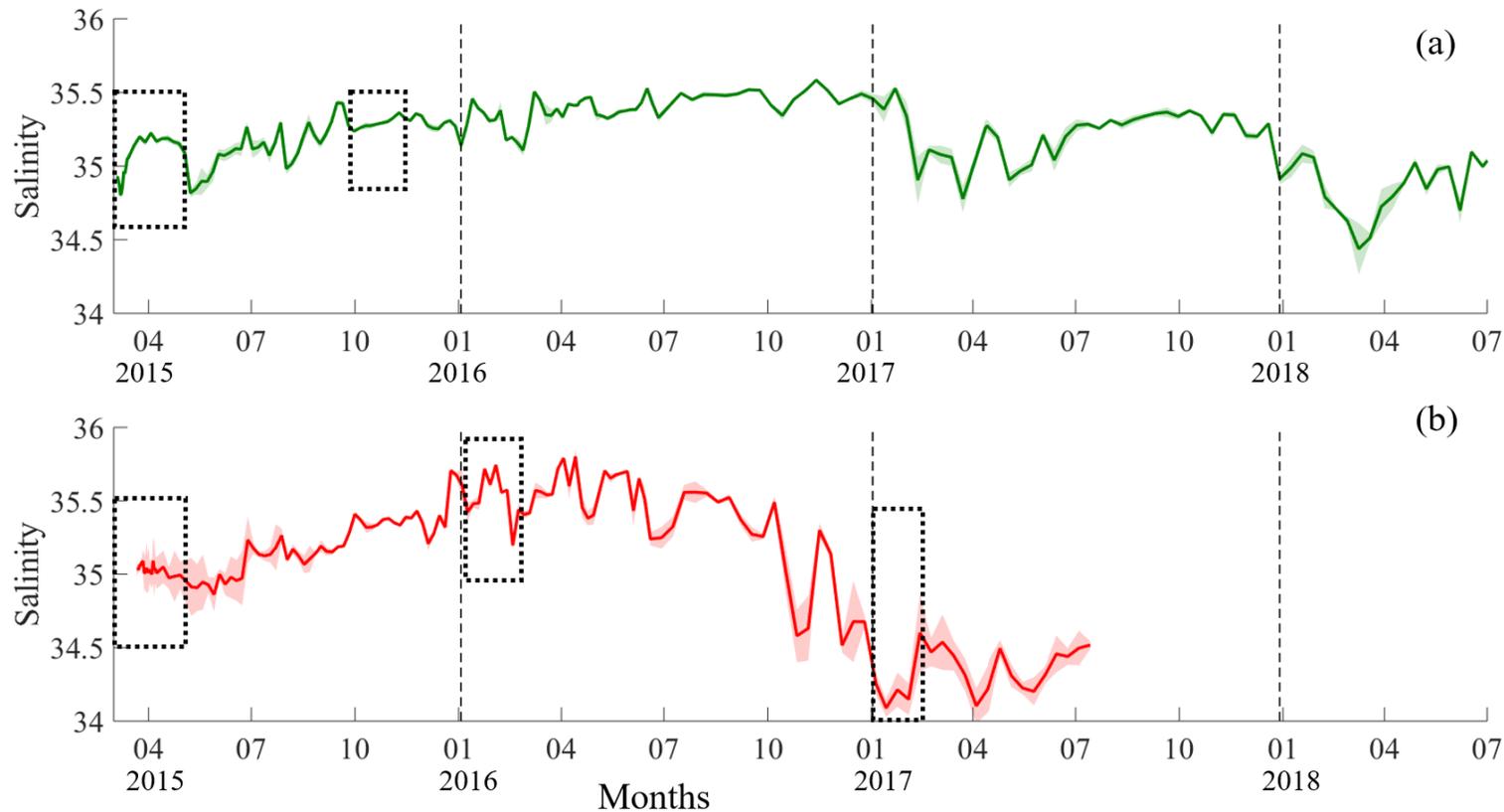
D'où provient le N qui supporte la production de PON^{opt} ?

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

Comment expliquer ces augmentations de PON^{opt} en période stratifiée ?

➤ **Apports atmosphériques et fluviaux de N ou de particules ?** (*Hansell et al., 2000 ; Jickells et al., 2017*)

➤ **Dépôt de particules très faible dans cette région** (*Wagener et al., 2008*)



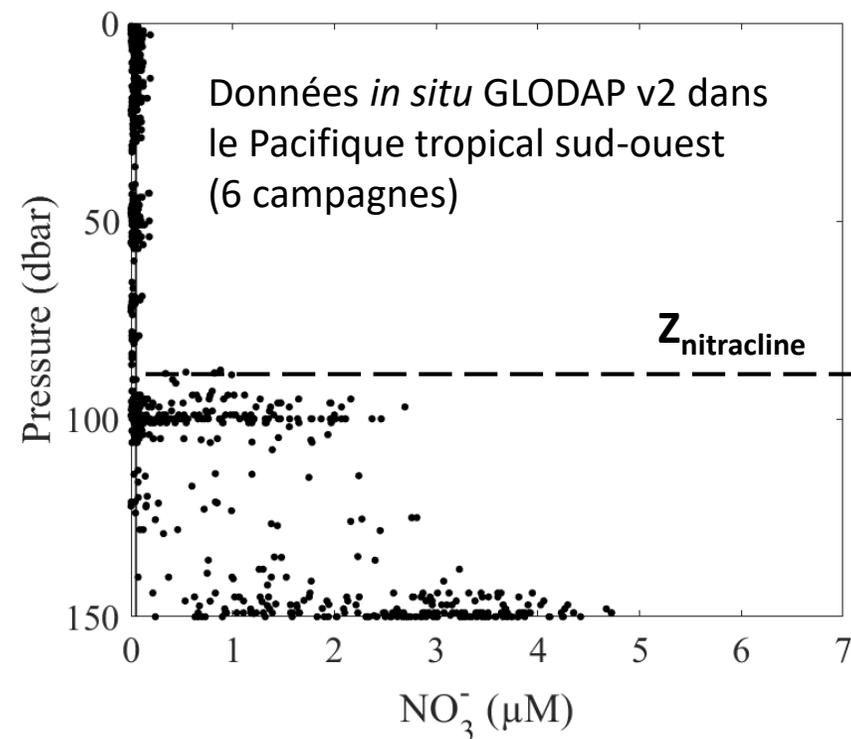
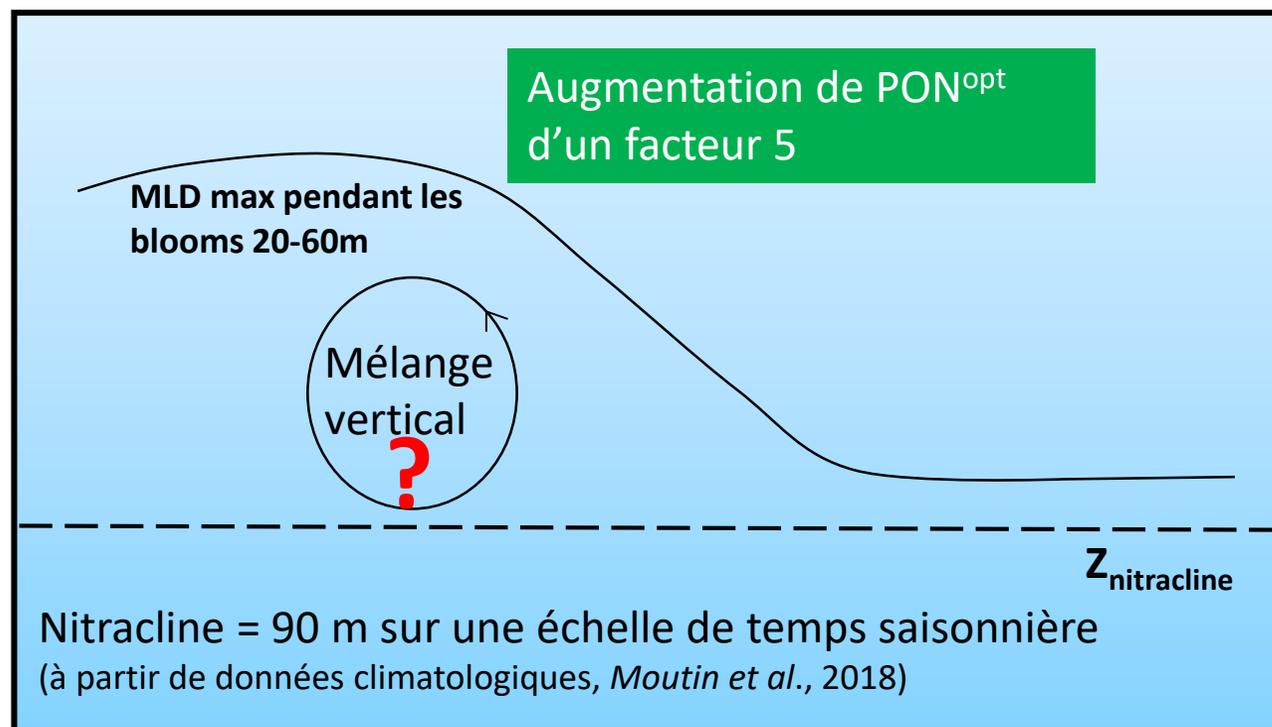
Salinité moyenne dans la ML

➤ Pas de baisse significative de salinité en surface parallèlement aux augmentations de PON^{opt}

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

Comment expliquer ces augmentations de PON^{opt} en période stratifiée ?

- Apports atmosphériques et fluviaux de N ou de particules ? (*Hansell et al., 2000 ; Jickells et al., 2017*)
- Mélange vertical : approfondissement de la MLD qui atteint la nitracline ?



- MLD n'atteint jamais la profondeur de la nitracline !

2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

Comment expliquer ces augmentations de PON^{opt} en période stratifiée ?

- Apports atmosphériques et fluviaux de N ou de particules ? (Hansell et al., 2000 ; Jickells et al., 2017)
- Mélange vertical : approfondissement de la MLD qui atteint la nitracline ?
- Processus méso-échelle/ Ondes internes : déplacement de la nitracline ? (McGillicuddy et al., 2007)

Lors d'évènements extrêmes, par ex: cyclone

Absence d'augmentation de $[NO_3^-]$ dans les 60 mètres

- Mélange vertical n'atteint pas la nitracline

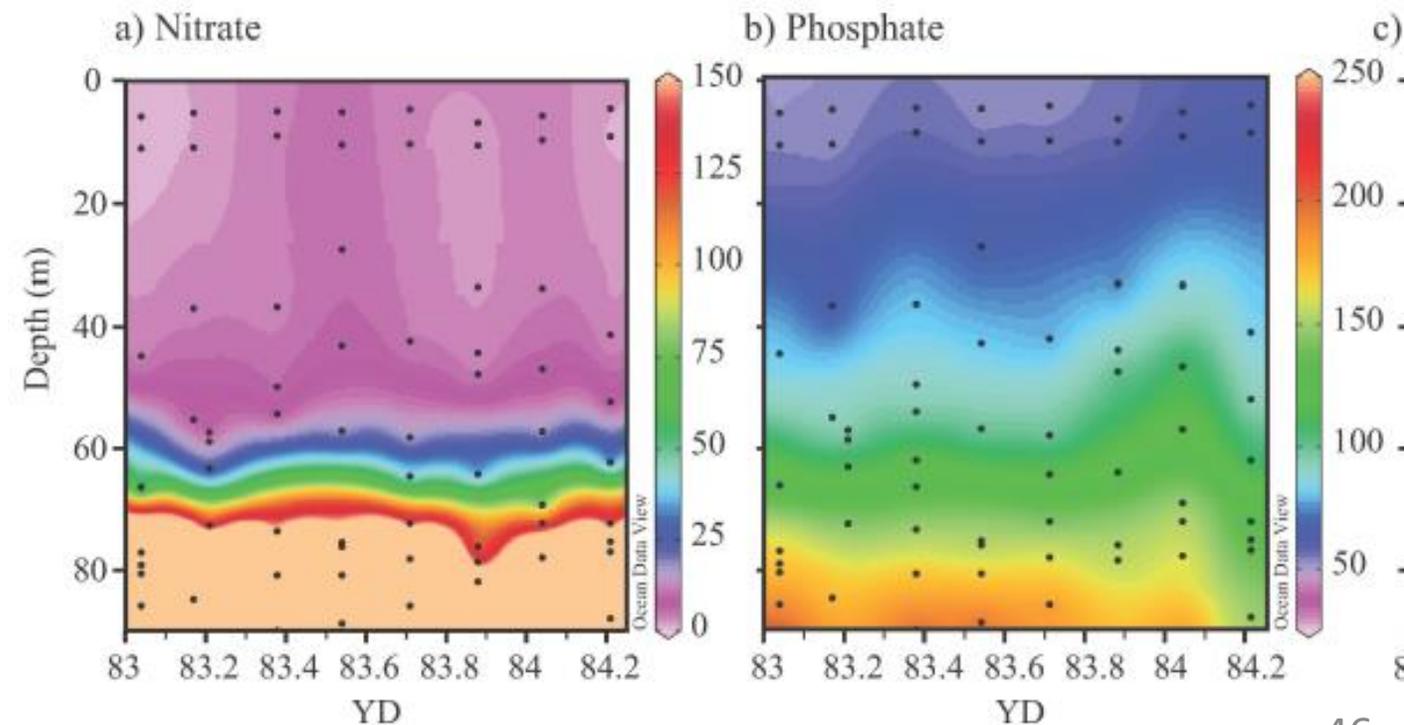
Phosphacline moins profonde que la nitracline

- Augmentation des $[PO_4^{3-}]$ en surface
- Favorise la fixation de N_2

Law et al. (2011)

Response of surface nutrient inventories and nitrogen fixation to a tropical cyclone in the southwest Pacific

Concentrations en éléments nutritifs pendant un cyclone



2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

Comment expliquer ces augmentations de PON^{opt} en période stratifiée ?

- **Apports atmosphériques et fluviaux de N ou de particules ?** (*Hansell et al., 2000 ; Jickells et al., 2017*)
- **Mélange vertical : approfondissement de la MLD qui atteint la nitracline ?**
- **Processus méso-échelle/ Ondes internes : déplacement de la nitracline ?** (*McGillicuddy et al., 2007*)
- **N_2 fixation : apport de N nouveau ?**



Peter Falk

D'où provient le N qui supporte la production de PON^{opt} ?

En absence d'autres apports de NO_3^- , les augmentations de PON^{opt} reflètent un apport de N *via* la fixation de N_2

Capteur de NO_3^- sur les flotteurs + suivi temporel de PON^{opt}

→ identifier/quantifier sans aucun doute possible les événements de fixation de N_2 dans les régions oligotrophes

En résumé

Dans le WTSP

- Proposition d'un **nouveau proxy optique** de la MOP entre 0 et 150 m bien adapté aux régions oligotrophes :
 $PON^{opt} = 1280 \times b_{bp} - 0,38$
- Augmentation de PON^{opt} d'un **facteur 2 à 5 en période estivale stratifiée**
- En absence d'apport vertical de NO_3^- , les augmentations de PON^{opt} reflètent un **apport de N via la fixation de N_2**

Et plus en profondeur, dans la couche où les $[NO_3^-]$ sont suffisantes, mais limitée par la faible disponibilité en lumière ?

L'article...

Optical proxy for particulate organic nitrogen from Bio Argo floats

ALAIN FUMENIA,^{1*} ANNE PETRENKO,^{1*} HUBERT LOISEL², KAHINA DJAOUDI³,
ALAIN DEVERNEIL⁴ AND THIERRY MOUTIN¹

Soumission dans GRL



1^{er} éditeur bienveillant 😊



Reviewers 1 et 2 bienveillants 😊



Corrections, amélioration du article



Re-soumission article corrigé GRL



2nd éditeur



Reviewers (toujours 😊), quelques corrections supplémentaires



Corrections, amélioration de l'article



Re-re-soumission article corrigé GRL



Reviewers (toujours 😊), Ok avec l'article



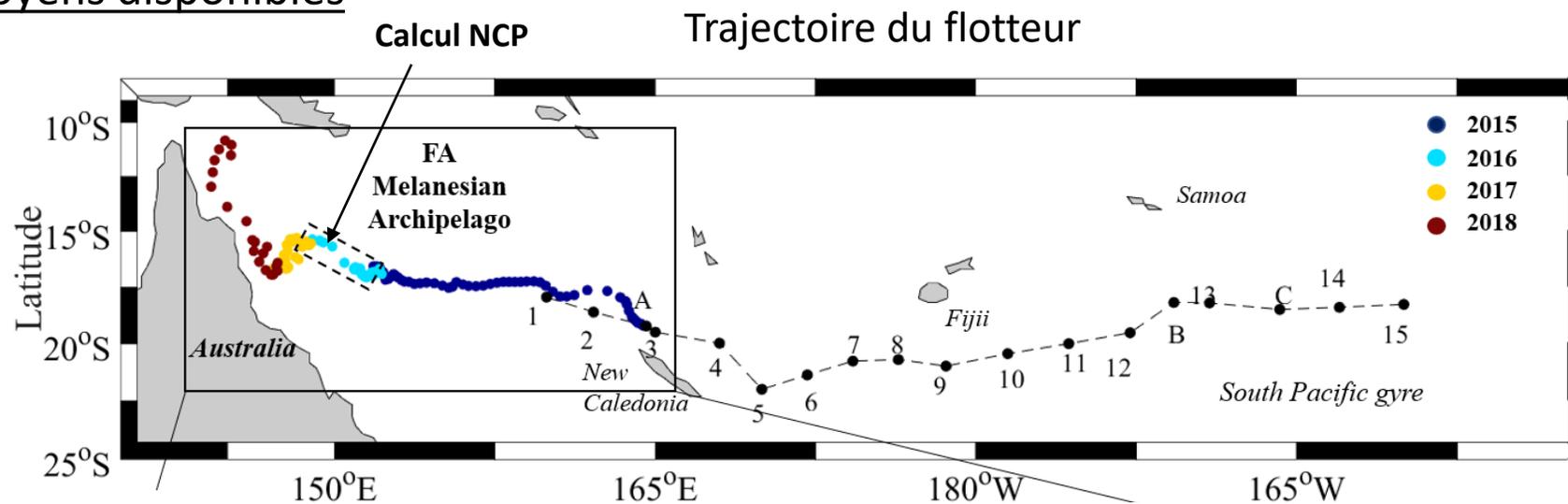
Article refusé par le 2nd éditeur



Article en révision dans *Optic Express*

2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Moyens disponibles



1 flotteur BGC-Argo
-LDA → flotteur F_A

Domaine spatio-temporel
~ 6 mois de mesures

- Ajustement des concentrations en O_2
- Isolement d'une masse d'eau « homogène » :
World Ocean Atlas 2013 → Circulation à grande échelle
Aviso, Hycom (Barbot et al., 2018) → Méso échelle
- Estimation de la NCP associée au SCML à partir des mesures d' O_2 flotteur
- Estimations des $[NO_3^-]$ avec le réseau de neurones CANYON-B

Travail réalisé pendant la thèse

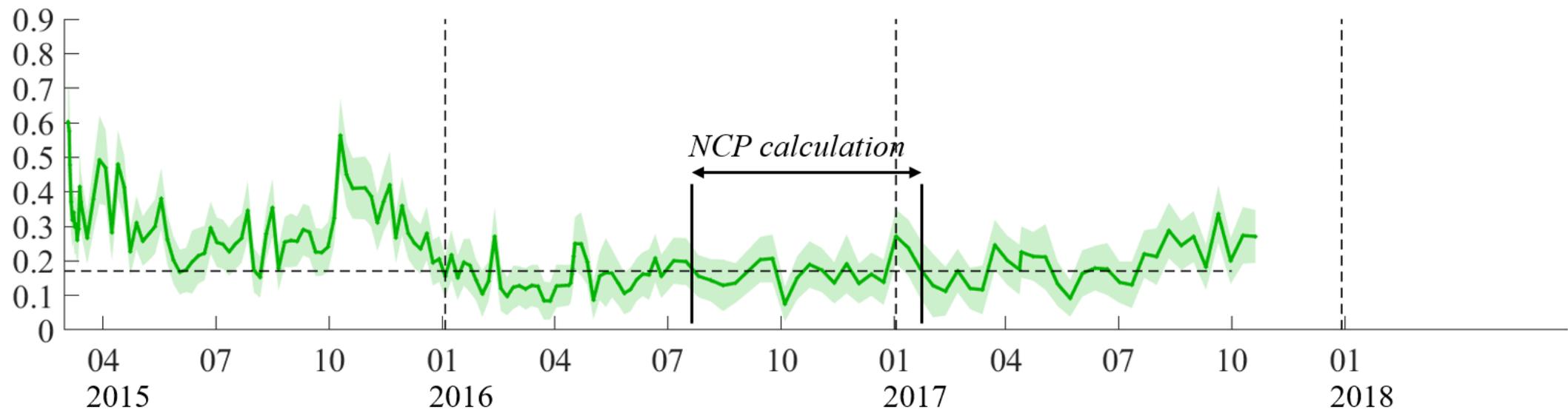
2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chl*a* de subsurface

Définition du domaine spatio-temporel pour le calcul de la NCP

- Dans une masse d'eau (relativement) homogène
- Conditions oligotrophes (pas de blooms en surface)
- [Chl*a*] < 0,1 mg m⁻³ et en [PON^{opt}] faibles et stables (0,20 μM)

[PON^{opt}] (μM)
(F_A)

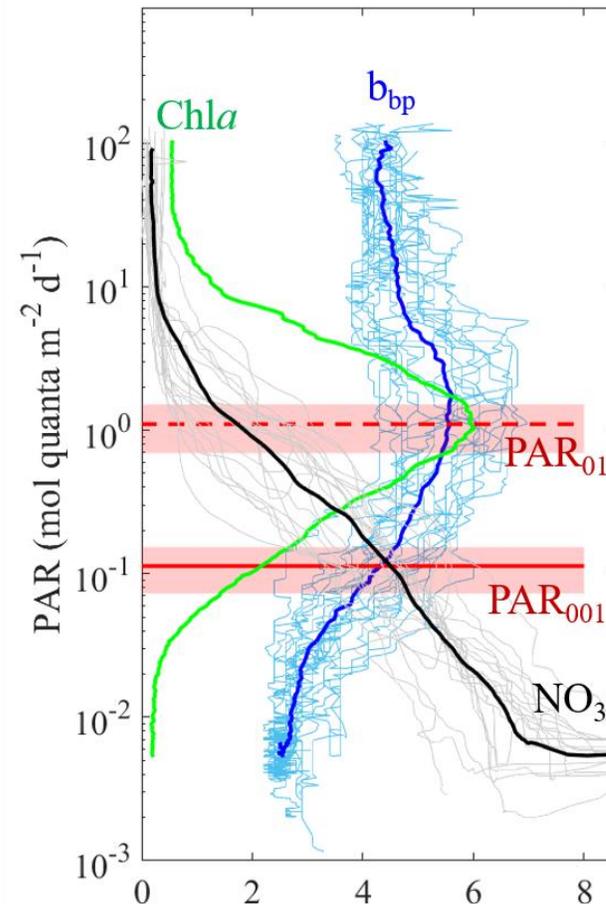
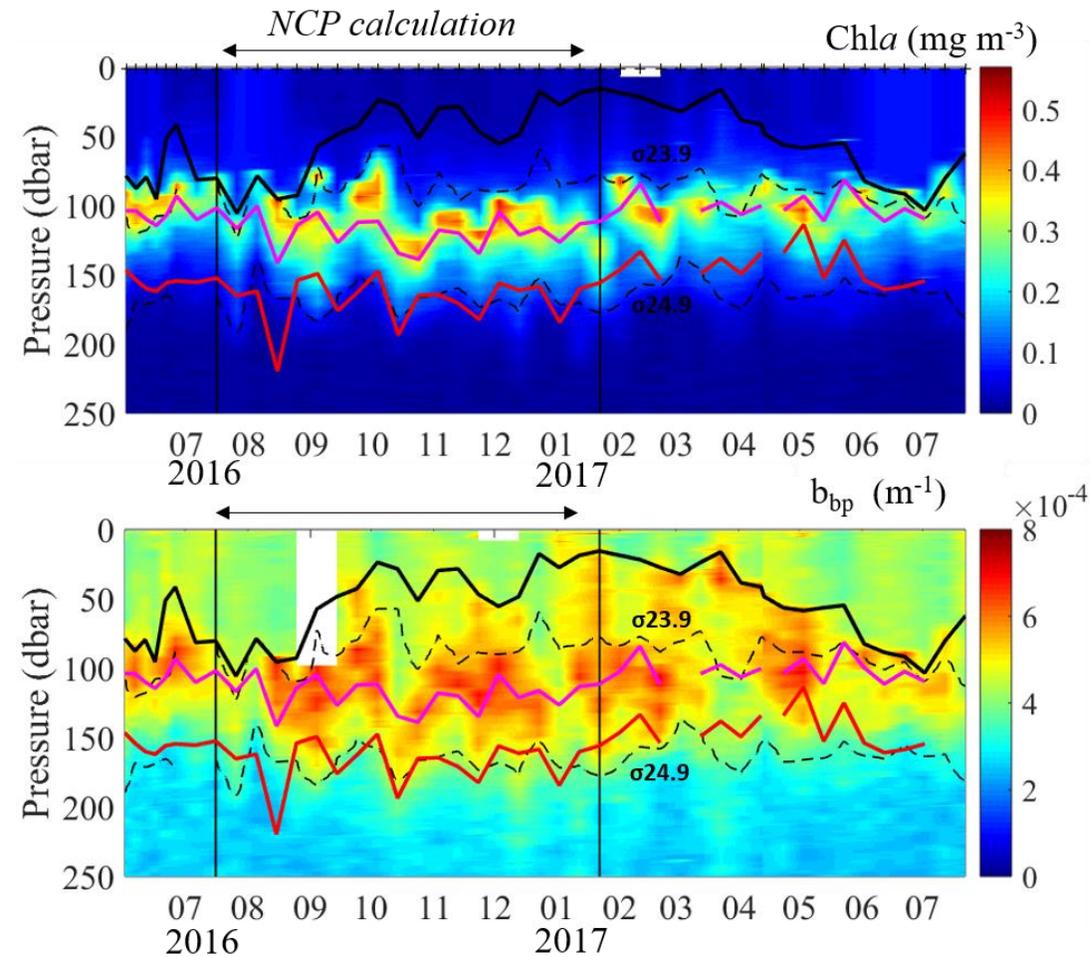
Du 26 juillet 2016 au 22 janvier 2017 (180 jours = 6 mois)



- Sous la MLD → système clos à l'échelle saisonnière non influencé par les échanges air-mer
(Riser and Johnson, 2008; Ducklow and Doney, 2013)

2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chl*a* de subsurface

Définition de la couche associée au maximum de Chl*a* de subsurface



- Max de Chl*a* centré sur Z₀₁
- S'étend jusqu'à Z₀₀₁ (0,1%)
- Max de Chl*a* = Max de b_{bp}
- Positionné entre σ_{23,9} et σ_{24,9}
- [NO₃⁻] suffisante pour soutenir une production nouvelle de MOP

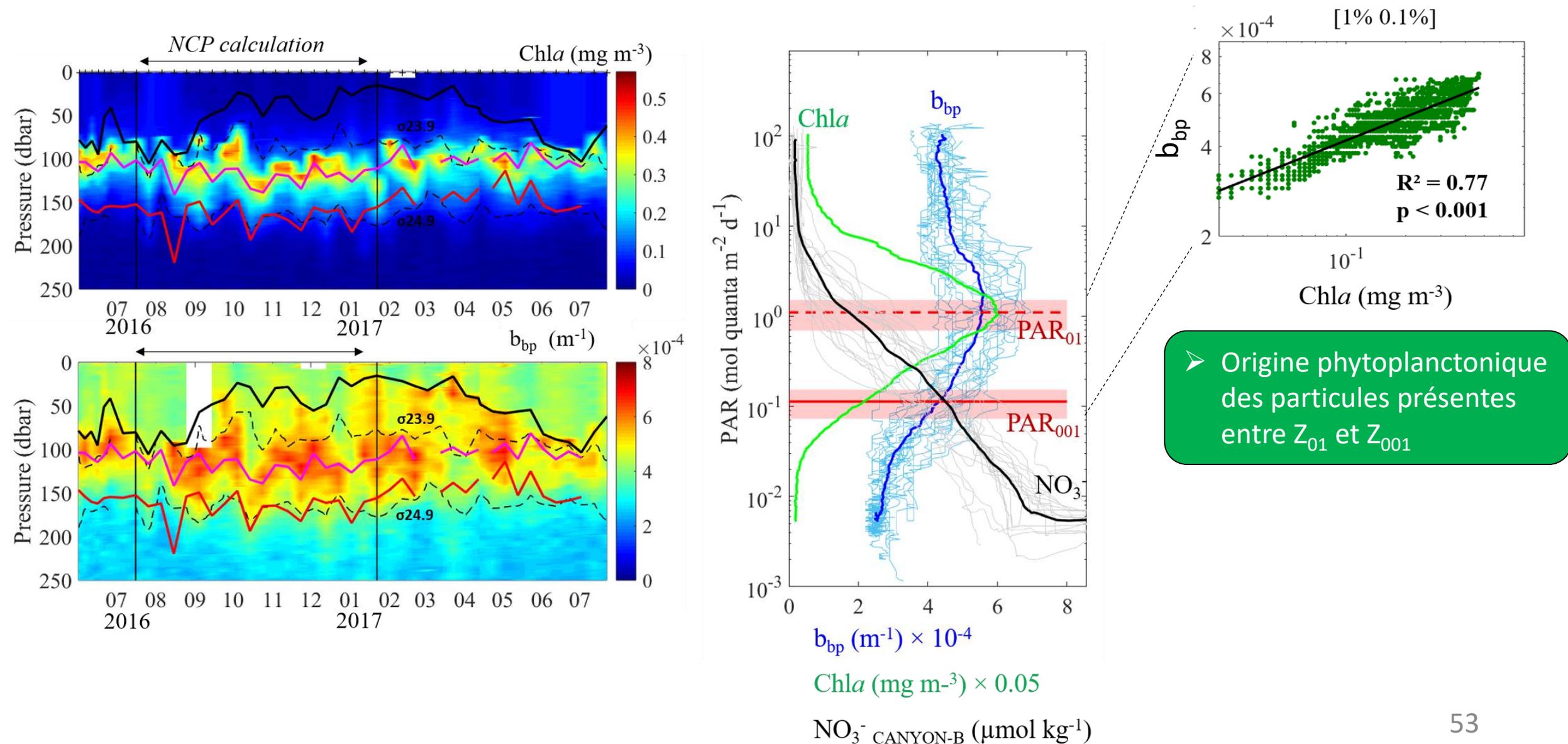
b_{bp} (m⁻¹) × 10⁻⁴

Chl*a* (mg m⁻³) × 0.05

NO₃⁻ CANYON-B (μmol kg⁻¹)

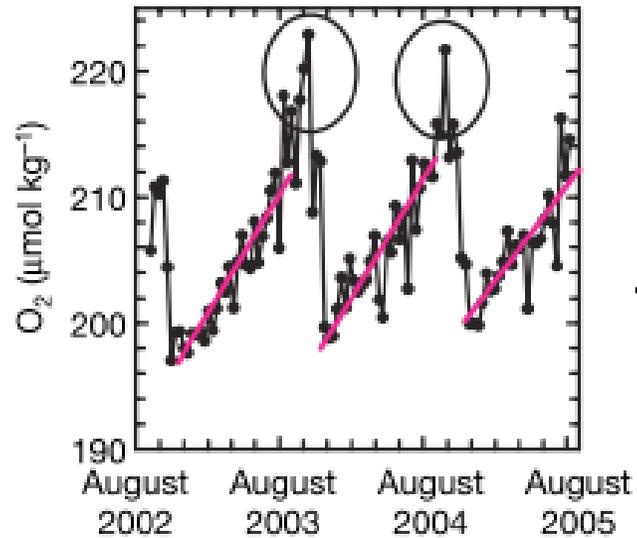
2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Définition de la couche associée au maximum de Chla de subsurface



2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Calcul de la NCP : Méthode adaptée de *Riser and Johnson, (2008)*



Dans la couche euphotique et à des profondeurs fixes

O_2 vs temps

= NCP $\text{mmol } O_2 \text{ m}^{-3} \text{ a}^{-1}$

= NCP $\text{mmol C m}^{-3} \text{ a}^{-1}$



Redfield ratio

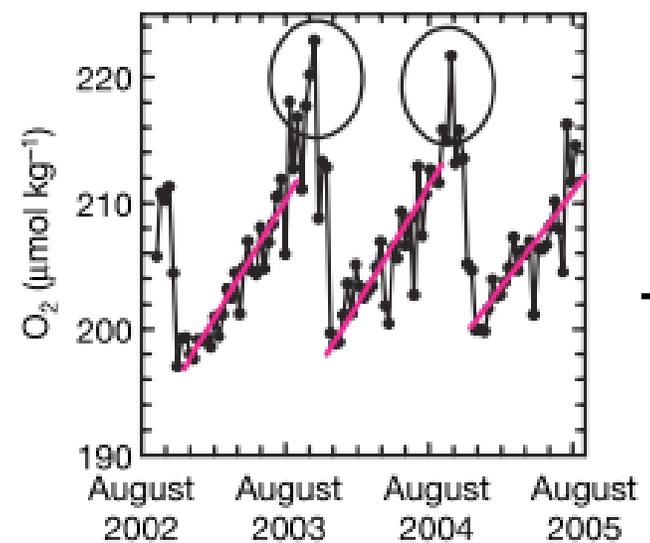
- NCP positive dans la couche euphotique à une échelle de temps saisonnière

$[O_2]$ vs temps à 78 m dans l'océan Pacifique nord

Riser and Johnson, (2008)

2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Calcul de la NCP : Méthode adaptée de *Riser and Johnson, (2008)*



Dans la couche euphotique et à des profondeurs fixes

O_2 vs temps
 $= NCP \text{ mmol } O_2 \text{ m}^{-3} \text{ a}^{-1}$
 $= NCP \text{ mmol C m}^{-3} \text{ a}^{-1}$

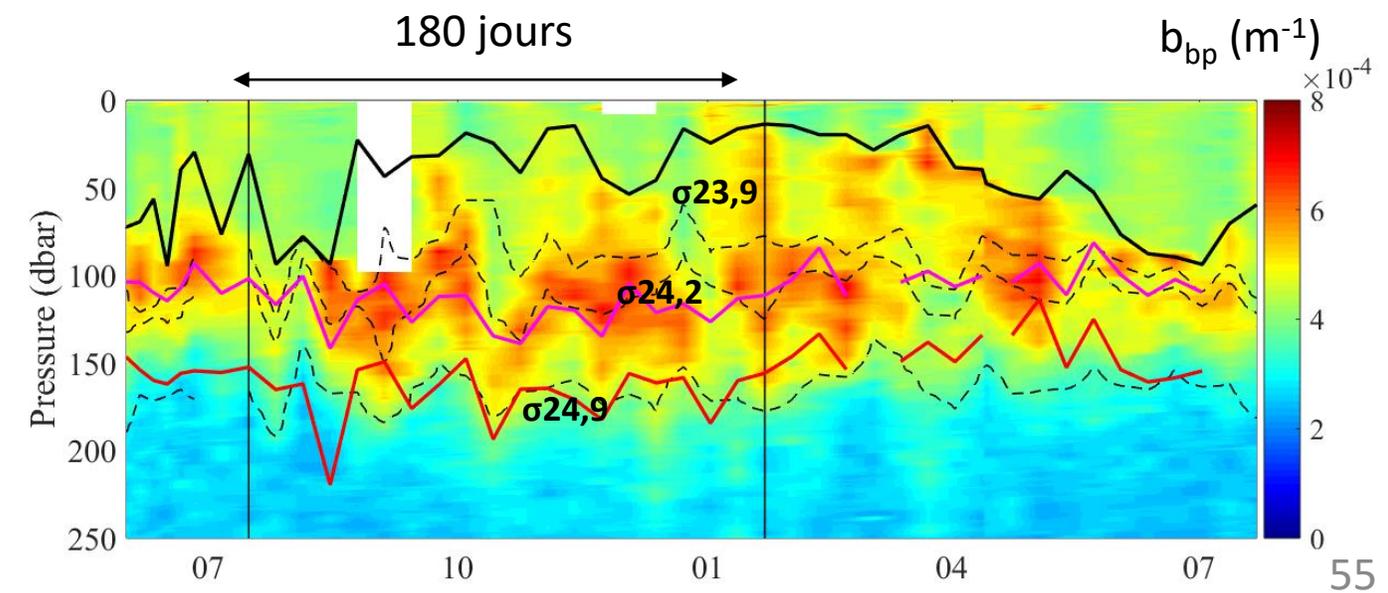


➤ NCP positive dans la couche euphotique à une échelle de temps saisonnière

[O₂] vs temps à 78 m dans l'océan Pacifique nord
Riser and Johnson, (2008)

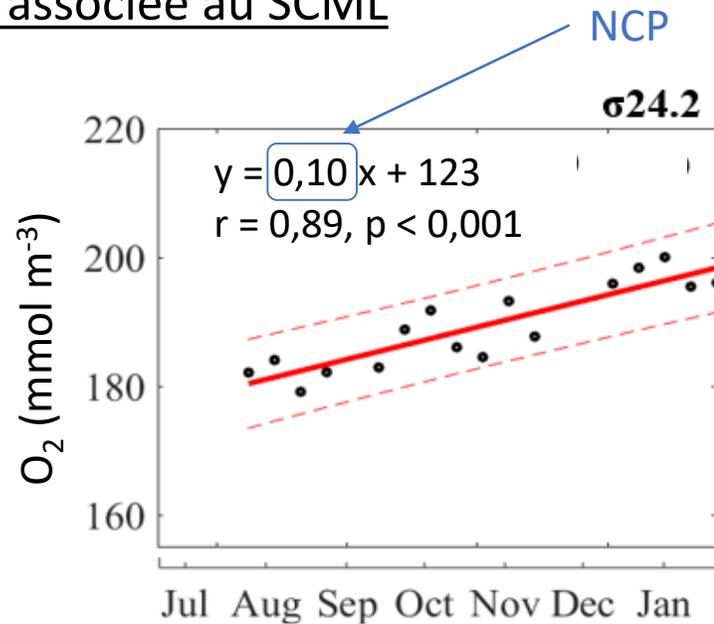
Dans notre étude

- Méthode appliquée seulement au SCML
- Jusqu'à la profondeur Z₀₀₁ et non Z₀₁
- Sur des surfaces isopycnales (σ_{23,9}- σ_{24,9}) et non à des profondeurs fixes



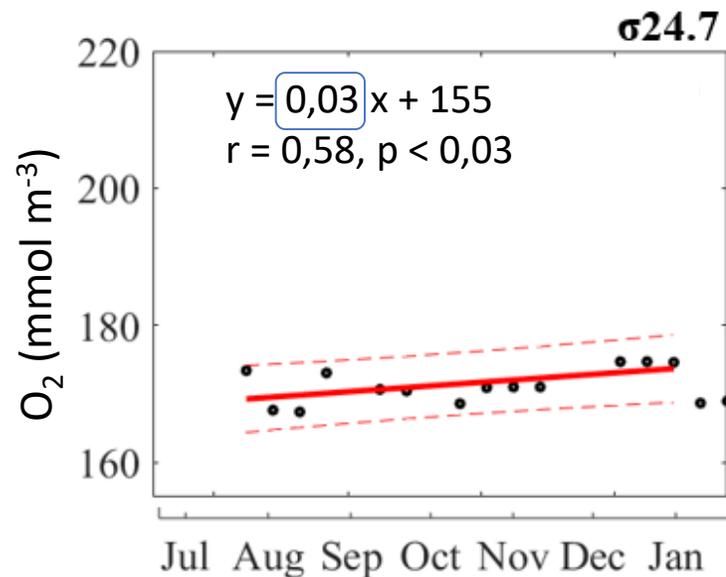
2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chl*a* de subsurface

NCP associée au SCML



[O₂] vs temps sur $\sigma_{24,2}$ (cœur du maximum de Chl*a*)

- Accumulation d'O₂ sur la période étudiée
- NCP maximale = 0,10 mmol m⁻³ j⁻¹



Sur $\sigma_{24,7}$ (juste au dessus du 0,1%)

- Accumulation d'O₂ faible mais encore significative
- NCP minimale = 0,03 mmol m⁻³ j⁻¹

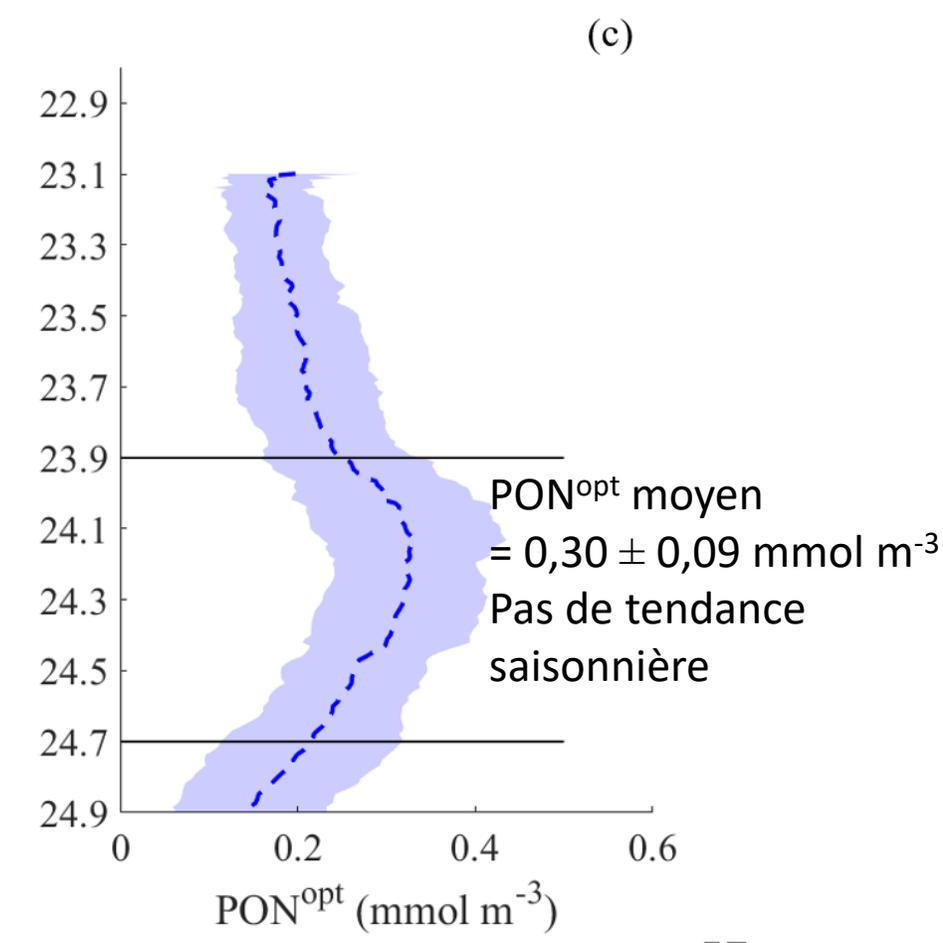
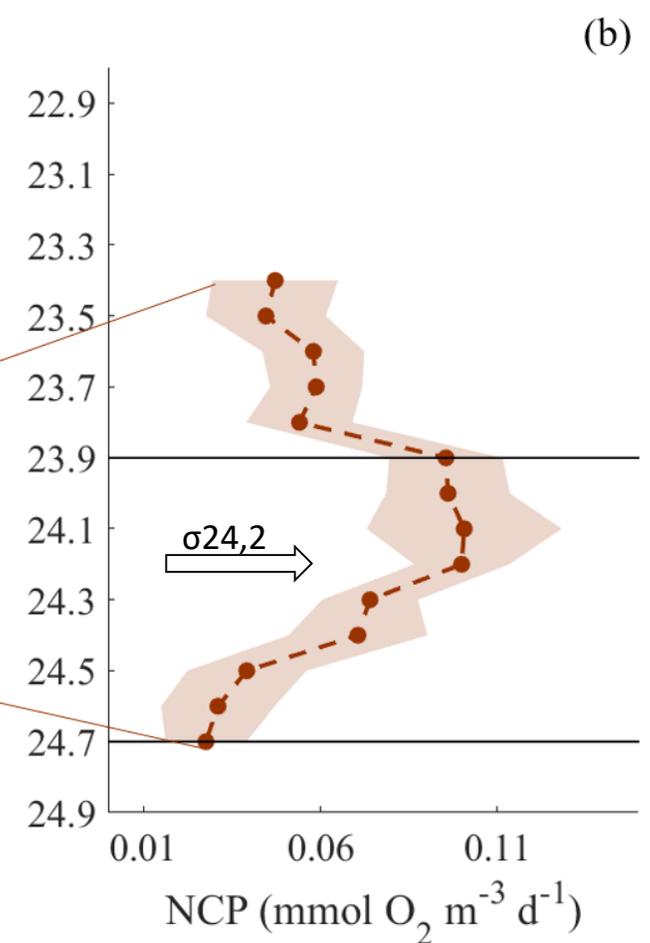
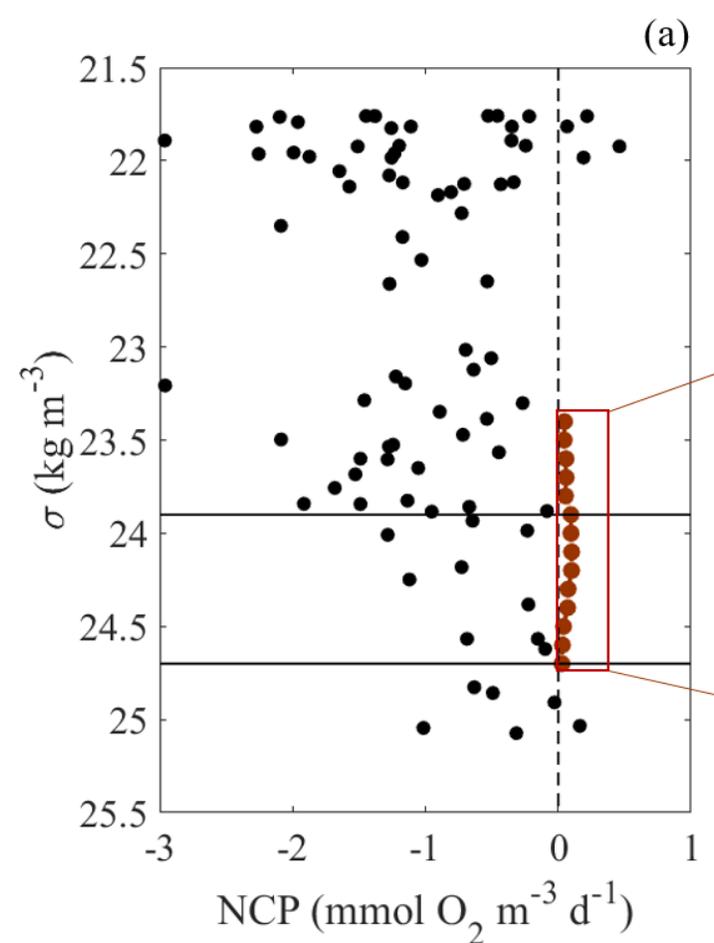
En dessous de $\sigma_{24,7}$, relation non significative

2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

NCP associée au SCML

Mesures *in vitro* (OUTPACE) (●)

Mesures flotteur (●)

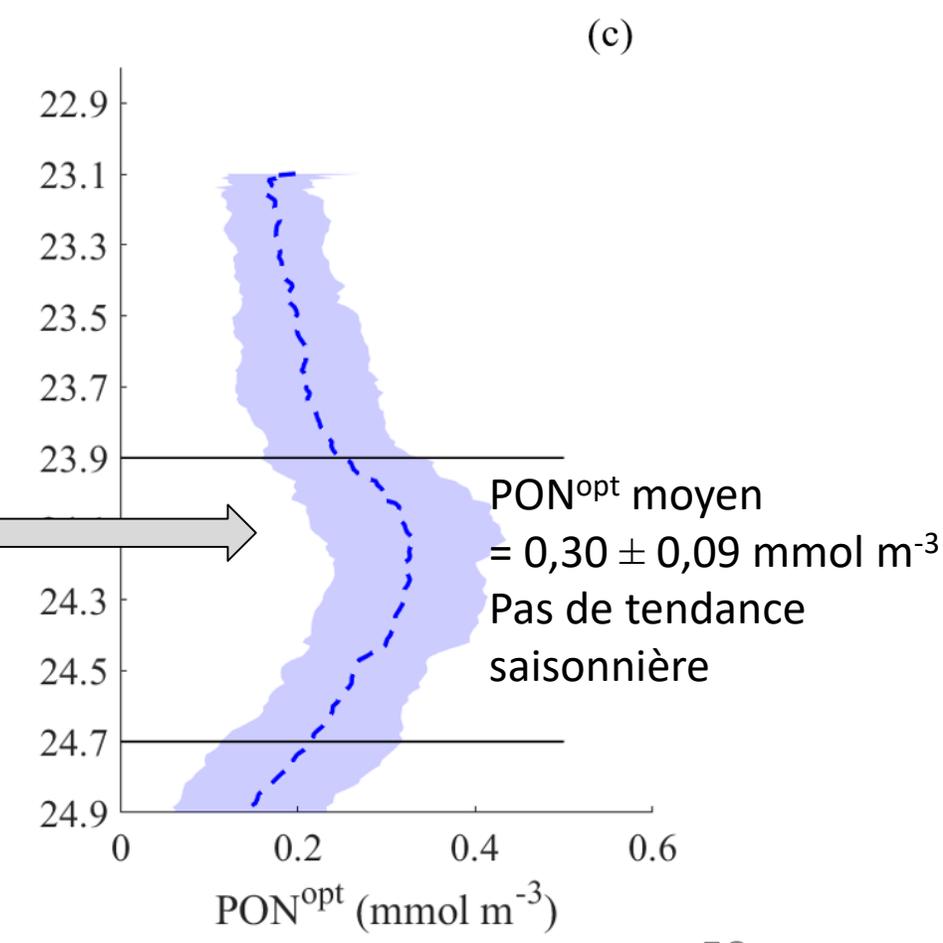
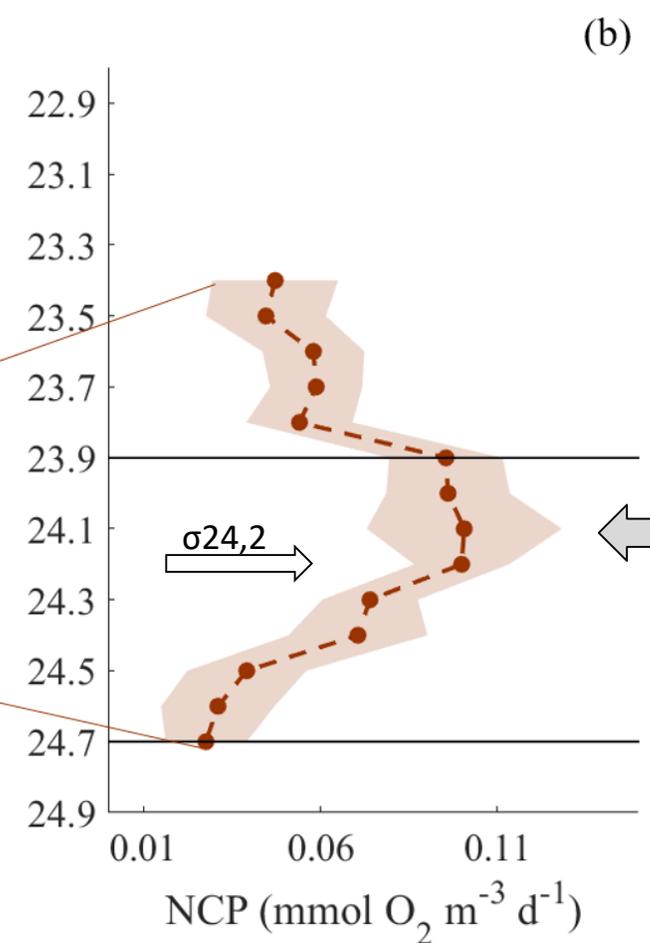
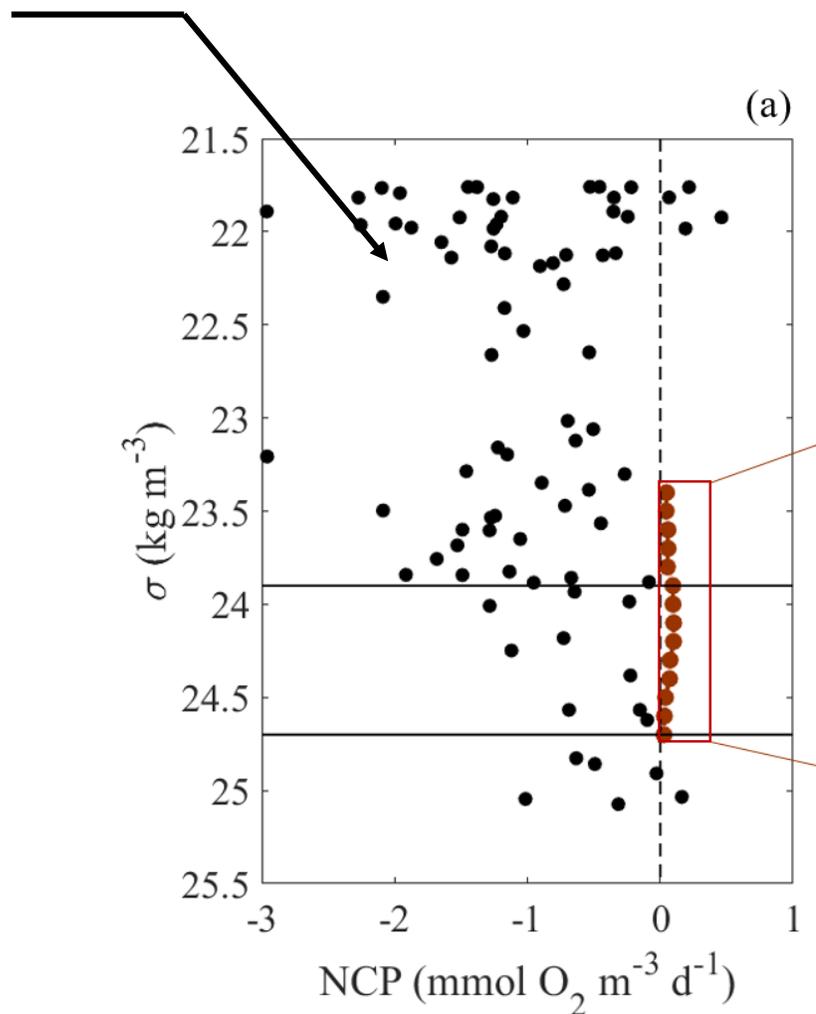


2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

NCP associée au SCML

Mesures *in vitro* (OUTPACE) (●)
NCP < 0

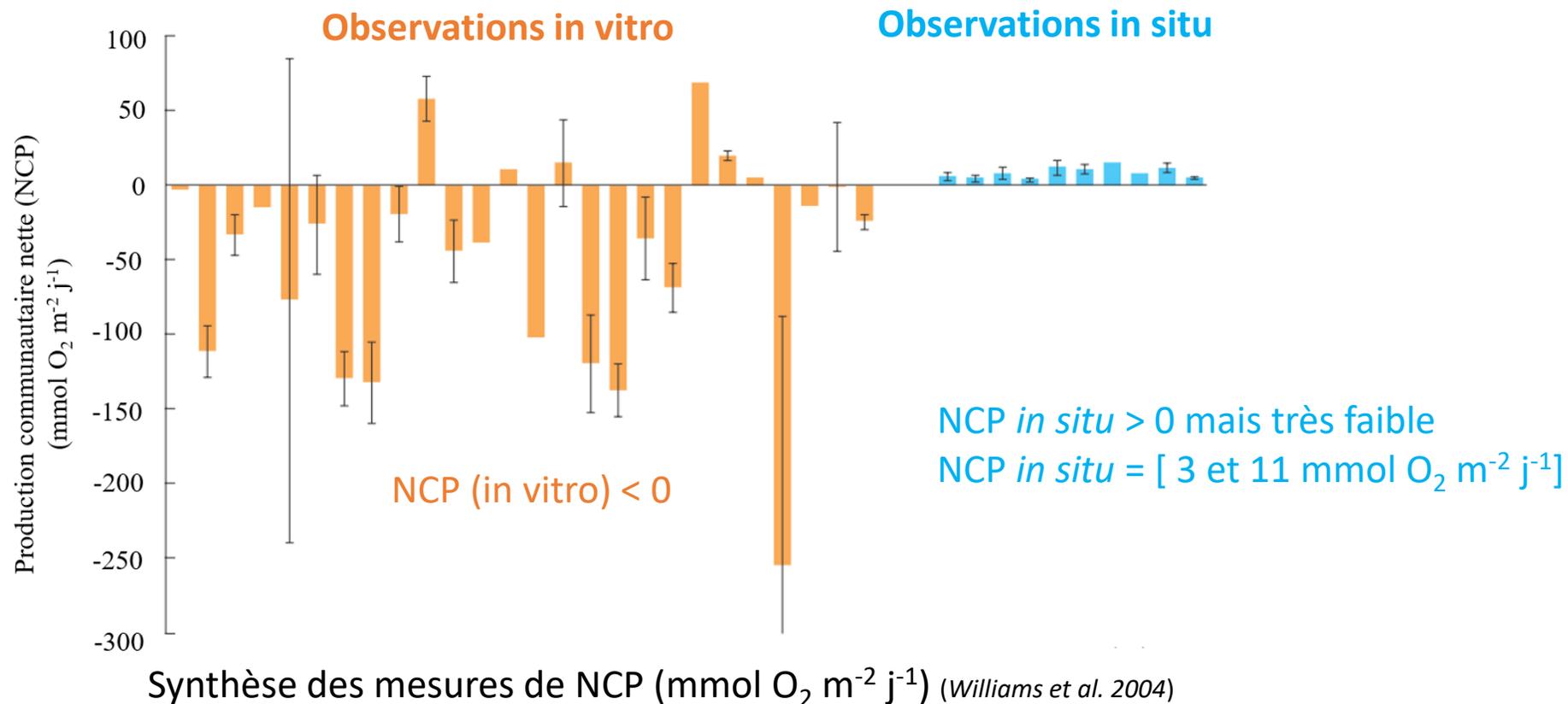
Mesures flotteur (●)
NCP > 0 associée à un maximum de PON^{opt}
NCP max = 0,10 mmol O₂ m⁻³ j⁻¹



2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Comparaison avec la littérature

Mesures réalisées entre la surface et le 1% de lumière



Dans notre étude, NCP moyenne

= $0,07 \pm 0,03$ mmol m⁻³ j⁻¹ sur une couche d'eau d'environ 63 m

= 2,5 – 3,8 mmol m⁻² j⁻¹

➤ Estimation de NCP faible mais positive cohérente avec la littérature

En résumé

Dans le WTSP

- **Maximum permanent de Chl a** de subsurface = photo acclimatation + **maximum de MOP**
- **Pas de variations saisonnières** de la [MOP] (PON^{opt} moyen = $0,30 \pm 0,09$ mmol m⁻³)
- **NCP > 0** au dessus du **1% de lumière** et jusqu'au **0,1%**

Où est passée la biomasse produite ?

- Exportée en profondeur / transférée dans la MOD / dans le réseau trophique ?

Dans notre site d'étude

- **Z₀₀₁** → **meilleure estimation de la profondeur de la couche euphotique**

2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

L'article...

A positive NCP associated to the subsurface chlorophyll-a maximum layer in the oligotrophic Western Tropical South Pacific: an argument to reconsider the net heterotrophic state of oligotrophic gyres

A. Fumenia¹, T. Moutin¹, D. Lefevre¹, H. Claustre² and A. Petrenko¹

Soumission dans GRL



2nd éditeur (toujours le même)



Reviewers 1 et 2

In Summary

The submitted paper reports an analysis of a very valuable piece of field work and I would like to see it published. However, I have mixed feelings about their analysis of the observations. My recommendation is that it is returned to the authors asking them to give attention to the following points: *(Peters Williams, reviewer 2)*



Article refusé par le 2nd éditeur

Améliorations à venir

- Titre à changer
- Référence à rajouter (Nicholson et al., 2008)
- Diffusion turbulente
- Prise en compte de « l'entraînement » des eaux sus et sous jacentes

Remise en cause des résultats ? A voir ?

Conclusion

- b_{bp} vs PON (**oxydation humide**) → Nouveau proxy optique PON^{opt}
 - Alternative au proxy du COP
 - Bien adapté à la **région oligotrophe** du Pacifique tropical sud-ouest
 - Possibilité d'estimer les concentrations/stocks de MOP sur une échelle de temps saisonnière

Conclusion

- b_{bp} vs PON (**oxydation humide**) → Nouveau proxy optique PON^{opt}
 - Alternative au proxy du COP
 - Bien adapté à la **région oligotrophe** du Pacifique tropical sud-ouest
 - Possibilité d'estimer les concentrations/stocks de MOP sur une échelle de temps saisonnière

Gyre → N_2 fixation = $\sim 0,6 \text{ nmol L}^{-1} \text{ j}^{-1}$

[NOP] = $0,20 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{M}$
[POP] = $0,01 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{M}$

- Pas de variations saisonnières de NOP

Archipel Mélanésien → N_2 fixation = $\sim 15 \text{ nmol L}^{-1} \text{ j}^{-1}$

[NOP] = $0,65 \pm 0,20 \text{ } \mu\text{M}$
[POP] = $0,03 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{M}$

- Augmentation saisonnières en période estivale de NOP ($\times 2$ à 5)

Conclusion

- b_{bp} vs PON (**oxydation humide**) → Nouveau proxy optique PON^{opt}
 - Alternative au proxy du COP
 - Bien adapté à la **région oligotrophe** du Pacifique tropical sud-ouest
 - Possibilité d'estimer les concentrations/stocks de MOP sur une échelle de temps saisonnière

Gyre → N_2 fixation = $\sim 0,6 \text{ nmol L}^{-1} \text{ j}^{-1}$

[NOP] = $0,20 \pm 0,04 \text{ } \mu\text{M}$
[POP] = $0,01 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{M}$

- Pas de variations saisonnières de NOP

➤ **Maximum de Chl a /MOP de subsurface**

- $[\text{NO}_3^-]$ suffisante pour soutenir une production nouvelle
- $\text{NCP} > 0$ associé au maximum de biomasse

Archipel Mélanésien → N_2 fixation = $\sim 15 \text{ nmol L}^{-1} \text{ j}^{-1}$

[NOP] = $0,65 \pm 0,20 \text{ } \mu\text{M}$
[POP] = $0,03 \pm 0,01 \text{ } \mu\text{M}$

→ Augmentation saisonnières en période estivale de NOP ($\times 2$ à 5)

Perspectives

➤ Devenir de la MOP dans le Pacifique tropical sud-ouest?

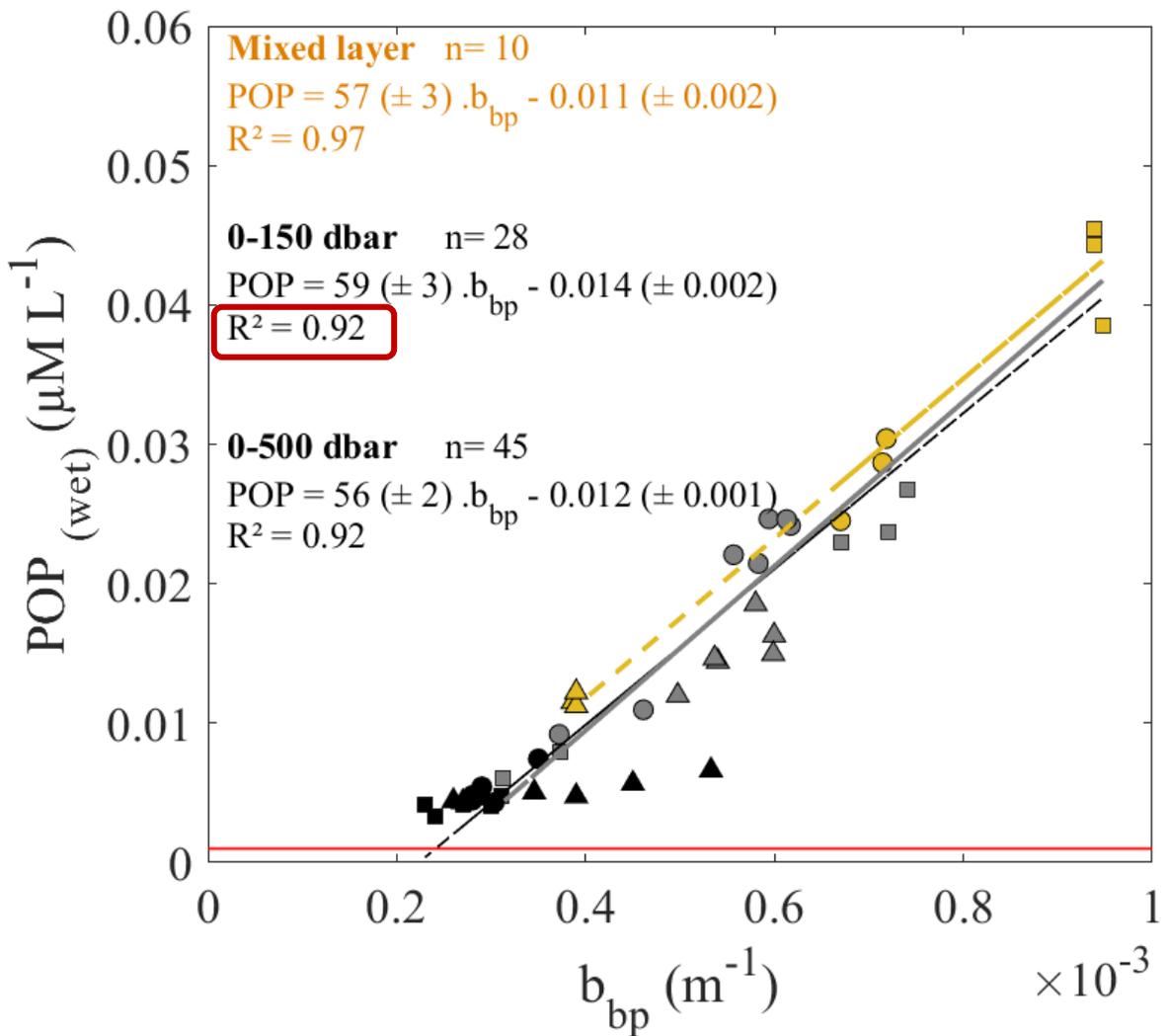
Compartiment dissous ? Export en profondeur ?

Rôle de cette région dans l'export de carbone, pompe biologique ?

➤ Proxy optique du PON dans d'autres régions oligotrophes (et non oligotrophes)

➤ Proxy optique du POP

Et le POP^{opt} ?



- Les mesures *in situ* de POP faites sur
- Le même échantillon que pour le NOP
 - Suivant la même méthode analytique
 - Associée aux mêmes données de b_{bp}

Meilleure relation statistique pour le POP^{opt} que pour le PON^{opt}

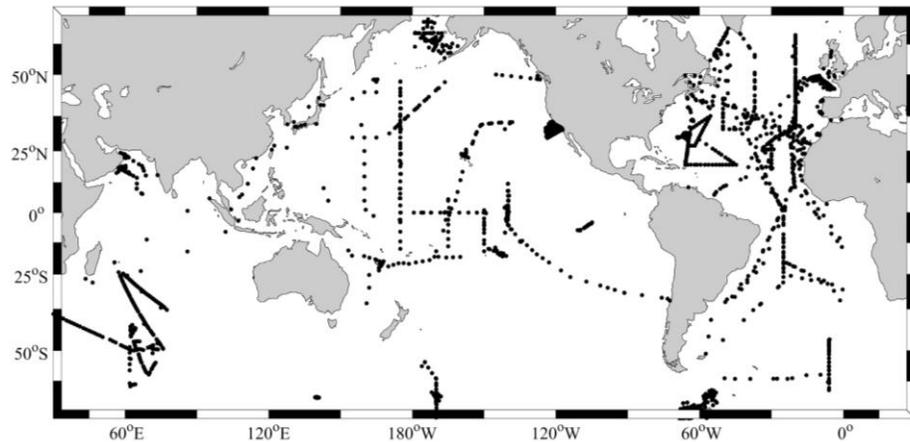
- Stock de POP moins variable d'un point de vue optique que le stock de NOP

Comment l'expliquer ?

Hypothèse

- POP est **reminéralisé plus rapidement** que le PON (et le POC) dans les milieux oligotrophes (*Schneider et al., 2003; Duhamel et al., 2007*)
- POP contient une plus forte contribution de **matériel vivant**
- Meilleure relation du b_{bp} avec les **particules vivantes** (*Martinez –Vicente et al., 2012; Graff et al., 2015*)
- POP^{opt} , un très bon proxy de la biomasse vivante ?

Mesures *in situ*



+

Données satellites b_{bp}

- Définir des bio-régions
 - Relations b_{bp} vs POP pour chaque bio-régions
- **Suivre et quantifier la dynamique saisonnière de la MOP**

Merci à Thierry et Anne

Merci à Sophie Rabouille, David Antoine, Hervé Claustre, Bernard Quéguiner et aux personnes visio-présentes

Avec la participation de



Thierry Moutin
(Ultimate/Proximate
encadrant)



Anne Petrenko
(Grand Optical
encadrante)



Alain deVerneil
(Matrix)



Kahina Djaoudi
(Ma P-sy)



Sandra Nunige
(Micronutriments
du labo)



Gilles Rougier
(C'était dit !
« CTD »)



Karine Leblanc
(POC, POC, POC !
Qui est la?)



Dominique Lefevre
(Bouffée d'O₂)



Mathieu Caffin



Sophie Bonnet



Mar Benavides

(Diazotroph team)



Hubert Loisel
(Bébé-pé)



Hervé Claustre
(Aqua Float man)

Diapositives supplémentaires

Travail réalisé pendant la thèse ?

1^{er} partie de la thèse (1 année et demi)

Objectif: budget de l'apport d'azote (N*)

- Analyse chimique NOP/COP
 - Traitement données de la campagne OUTPACE
 - Utilisation GLODAP_v2 et WOA 2013
 - Synthèse de la circulation des masses d'eau
- 
- Circulation des masses d'eau thermocline complexe
 - Données *in situ* (NO_3^- , PO_4^{3-} , GLODAP-v2) dans les hautes latitudes pas assez nombreuses
 - Budget difficile avec des mesures *in situ*



2nd partie de la thèse

- Besoin d'utiliser simulations numériques pour faire un budget du N
- Modèle non disponible au MIO
- Collaboration nécessaire

2nd partie de la thèse

Objectif: Proxy optique /NCP

- Traitement données flotteurs BGC Argo

→ COP, utilisation d'un CHN

Dans les régions oligotrophes

- besoin de grands volumes filtrés (8-10 L)
- adsorption de COD sur les filtres
- formation de particules
- nécessité d'acidifié les échantillons
- contaminations

(Moran et al., 1999; Gardner et al., 2003; Liu et al., 2005; Cetinić et al., 2012)

Alternative aux mesures de COP dans les milieux oligotrophes

→ NOP et POP, utilisation de la méthode d'oxydation humide

Dans les régions oligotrophes

- besoin de petits volumes filtrés (1 L)
- moins couteuse en temps
- moins de contaminations
- sensible et précise
- méthode adaptée au milieu oligotrophe

(Raimbault et al., 1999; Pujo-Pay et al., 1994)

Pourquoi le PON^{opt} ou le POP^{opt} (oxydation humide) est une alternative intéressante ?

Comparaison entre 2x6 replicats d'échantillons de NOP pour la methode CHN et oxydation humide

	NOP (CHN)	NOP (Wet oxidation)
Moyenne (μM)	0.308	0.310
SD (μM)	0.014	0.006
CV (%)	4.6	2.0

- Résultats similaires
- Plus grande précision avec l'oxydation humide

Limite de quantification = 10 fois l'écart type de 10 mesures de blancs (Currie, 1999)

Avec la méthode d'oxydation humide,

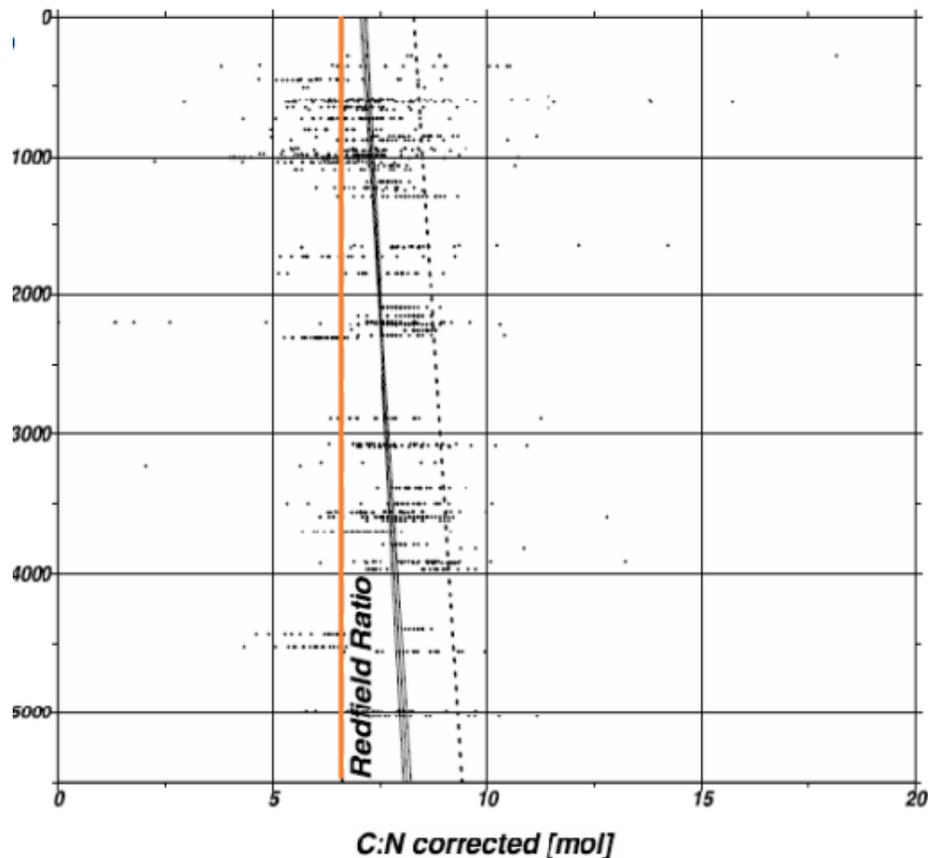
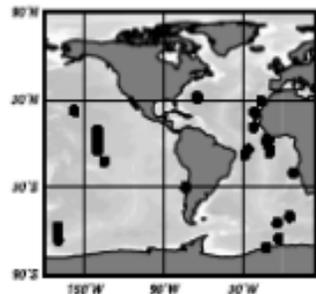
- LQ (PON) = 0.02 μM
- LQ (POP) = 0.001 μM

Capable de quantifier 1 nmol/L de POP avec une grande précision

- **Avantage de combiné b_{pp} avec des mesures réalisées avec l'oxydation humide dans les milieux oligotrophes**
- **Permet de quantifier stocks/flux de MOP sur une échelle de temps saisonnière**

Reminéralisation préférentielle du NOP

Variations du rapport C:N en fonction de la profondeur corrigé des apports lithogéniques (*Schneider et al., 2003*)



**C:N en fonction
de la profondeur**

- Augmentation de 0,2 unités/1000m du rapport C:N avec la profondeur
- NOP reminéralisé plus rapidement que le COP

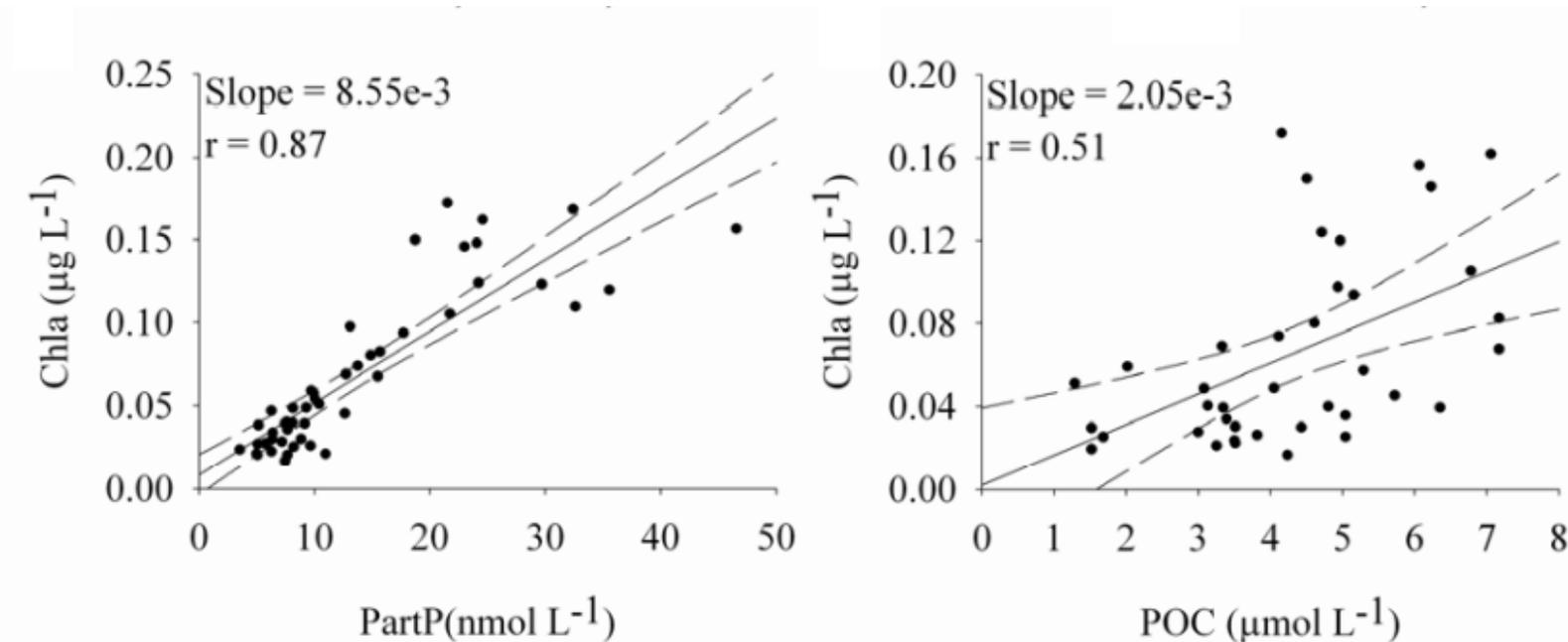
Reminéralisation préférentielle ?

Reminéralisation préférentielle du POP

Production d'ecto enzymes, par exemple, la phosphatase alcaline qui attaque les liaisons ester phosphate

→ Capable d'enlever du P à la matière.

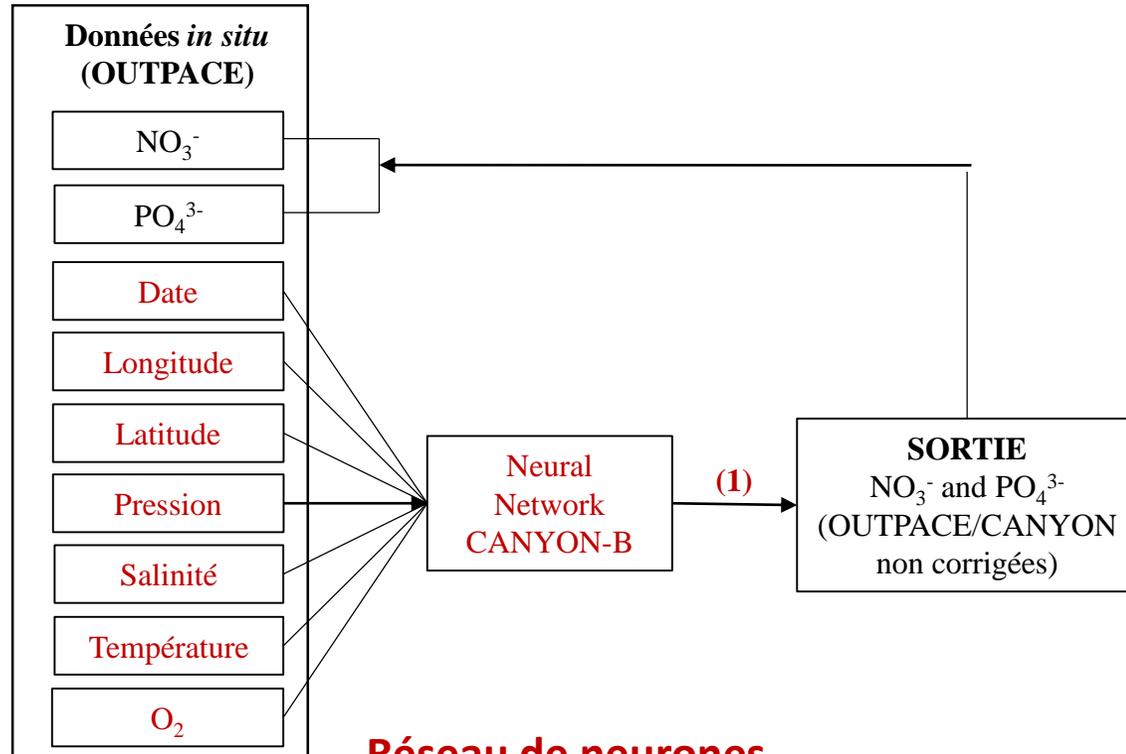
→ POP reminéralisé plus rapidement et reflète la biomasse vivante majoritairement



**Corrélation entre P particulaire et Chl a
meilleure qu'entre COP et Chl a**
→ P particulaire meilleur indicateur de la
biomasse vivante (*Duhamel et al., 2007*)

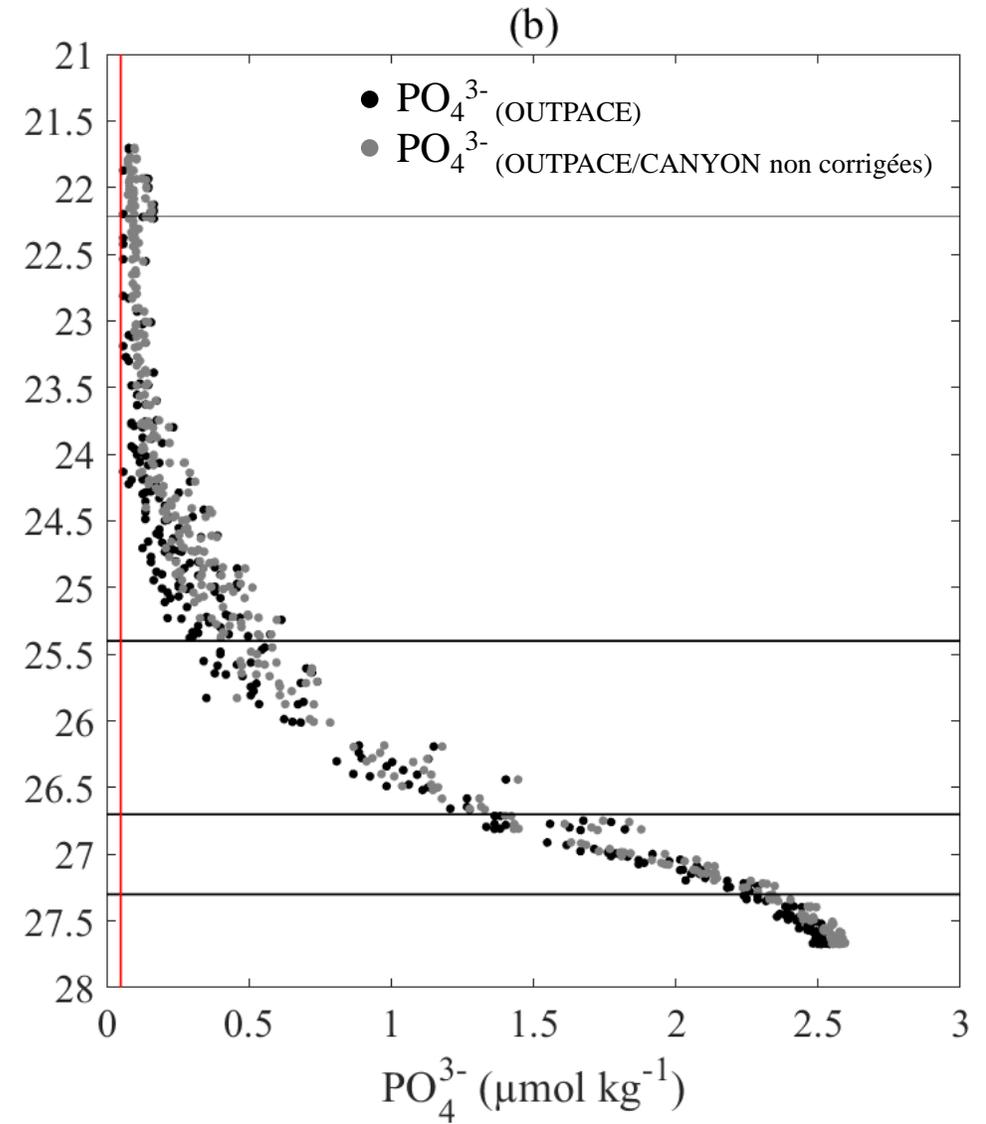
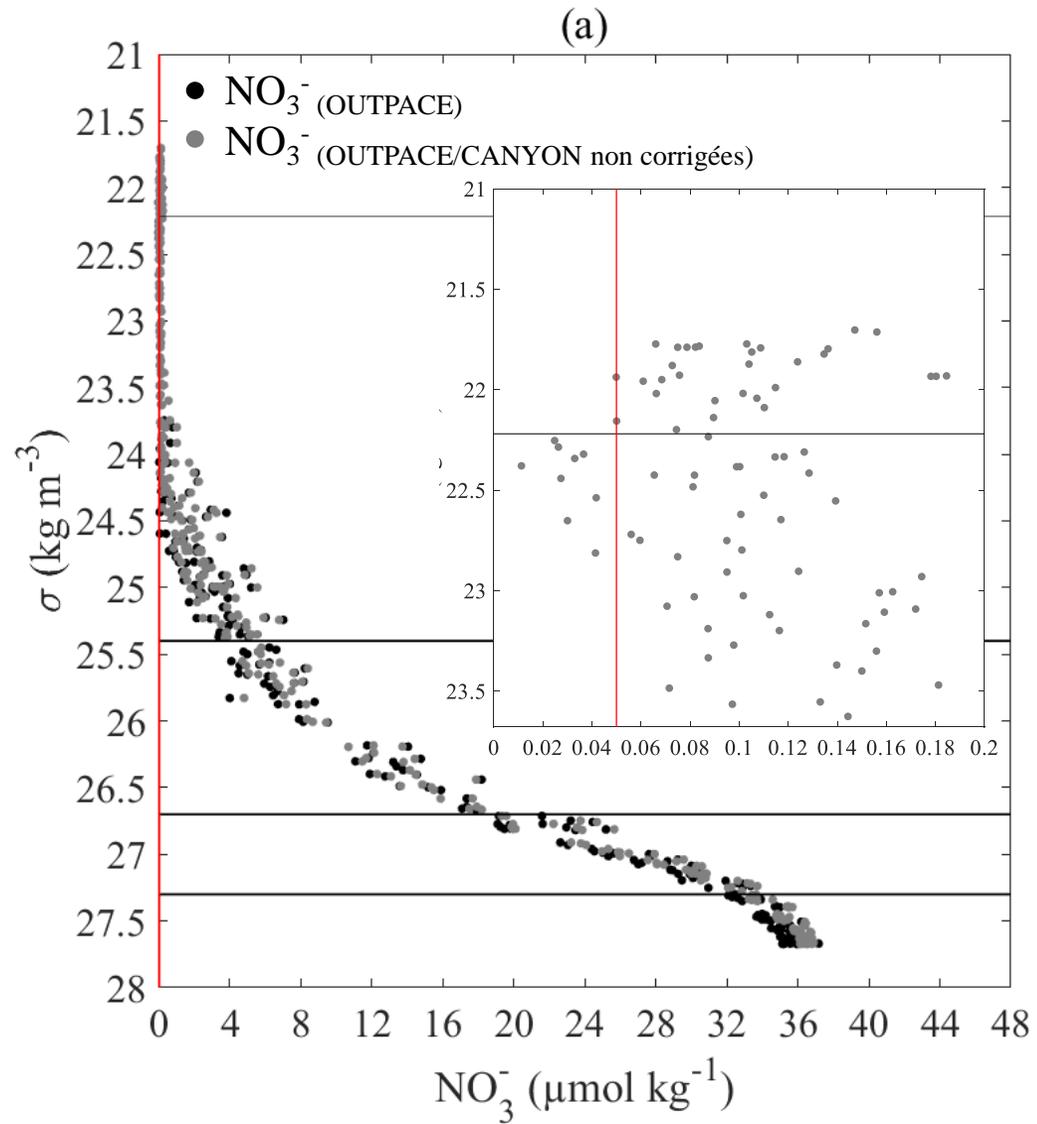
Campagne BIOSOPE dans le Pacifique tropical sud-est

Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018)

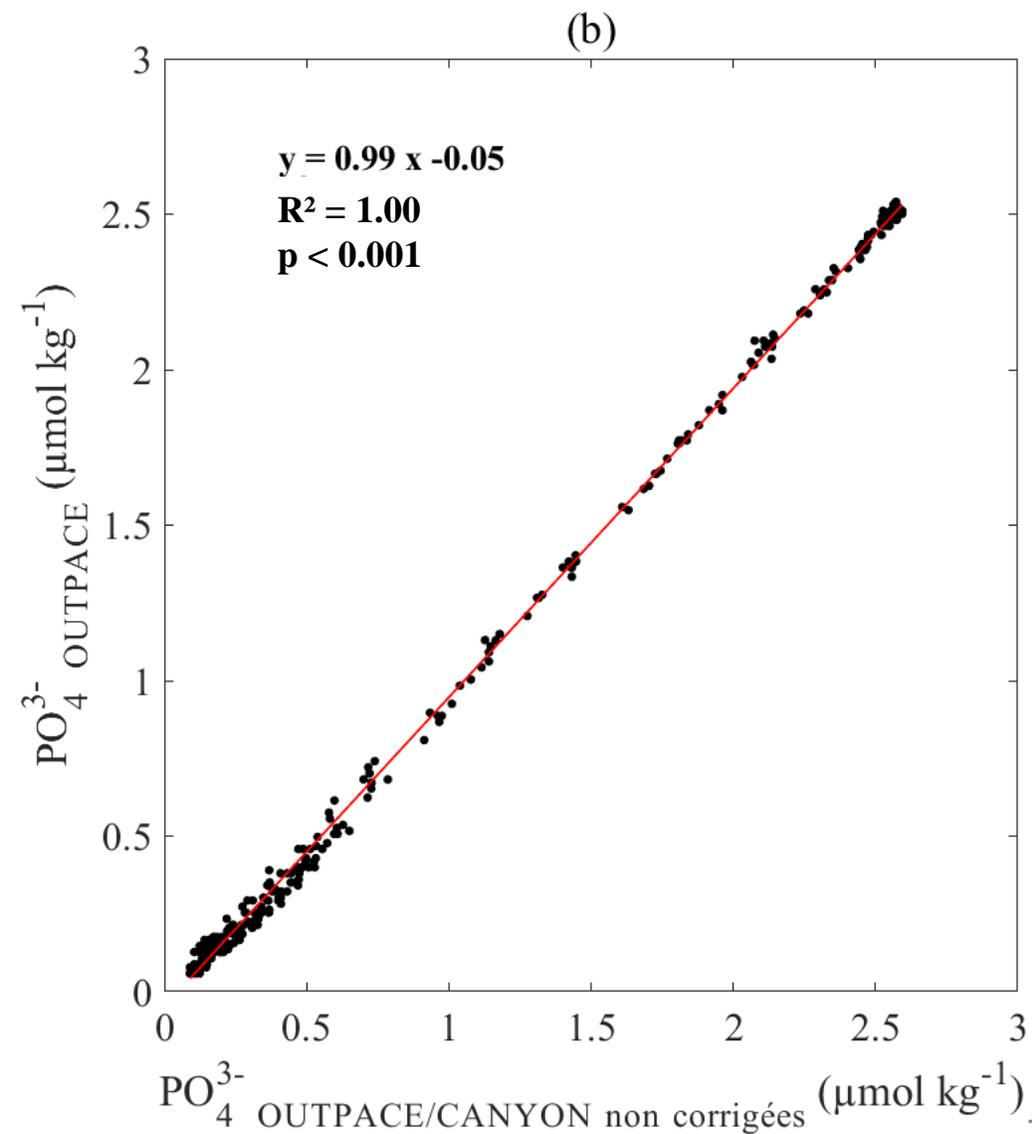
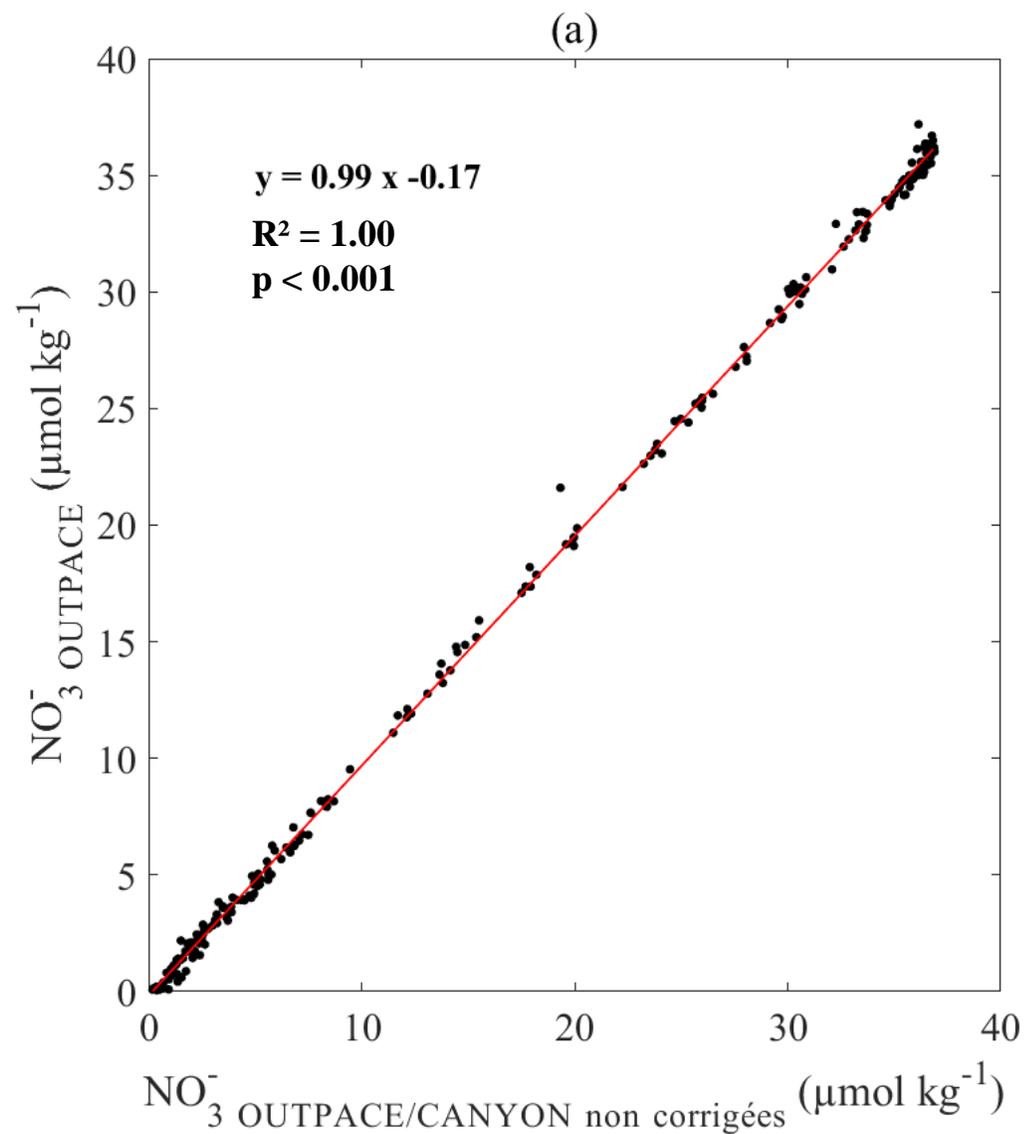


**Réseau de neurones
entraînés par le jeu de
donnée GLODAP_v2**

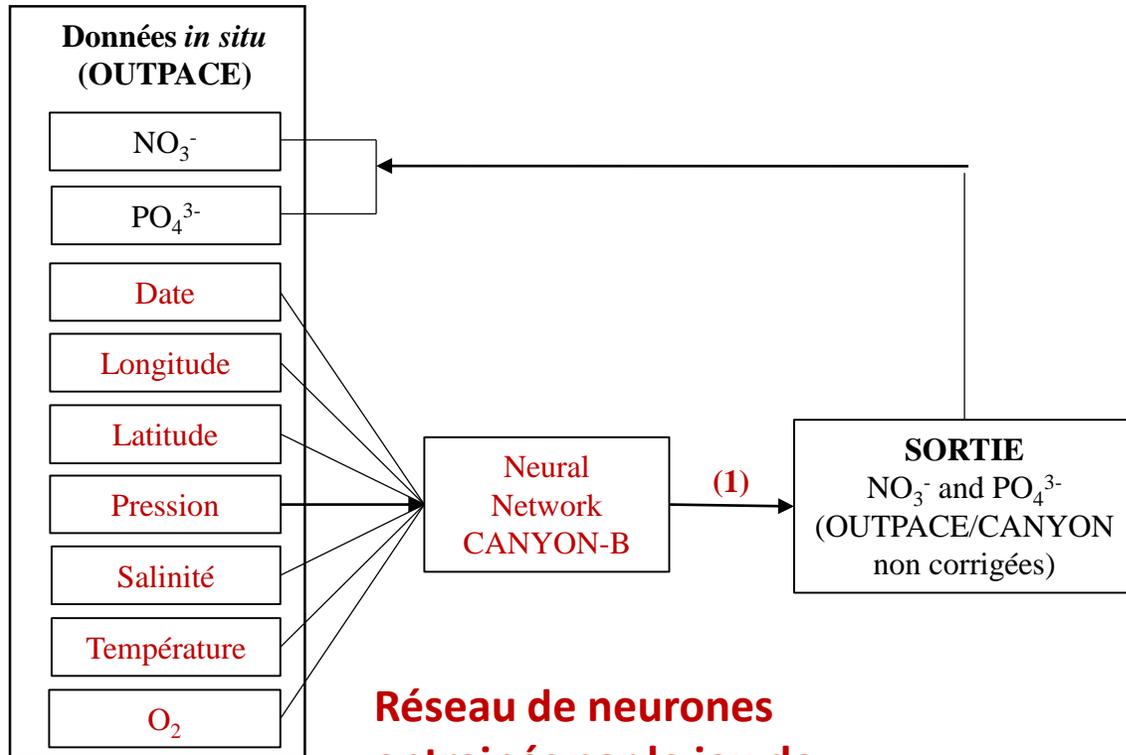
1^{er} étape : test réseau de neurones dans notre région ?
Valide dans notre région

Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (*Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018*)

Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (*Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018*)



Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018)



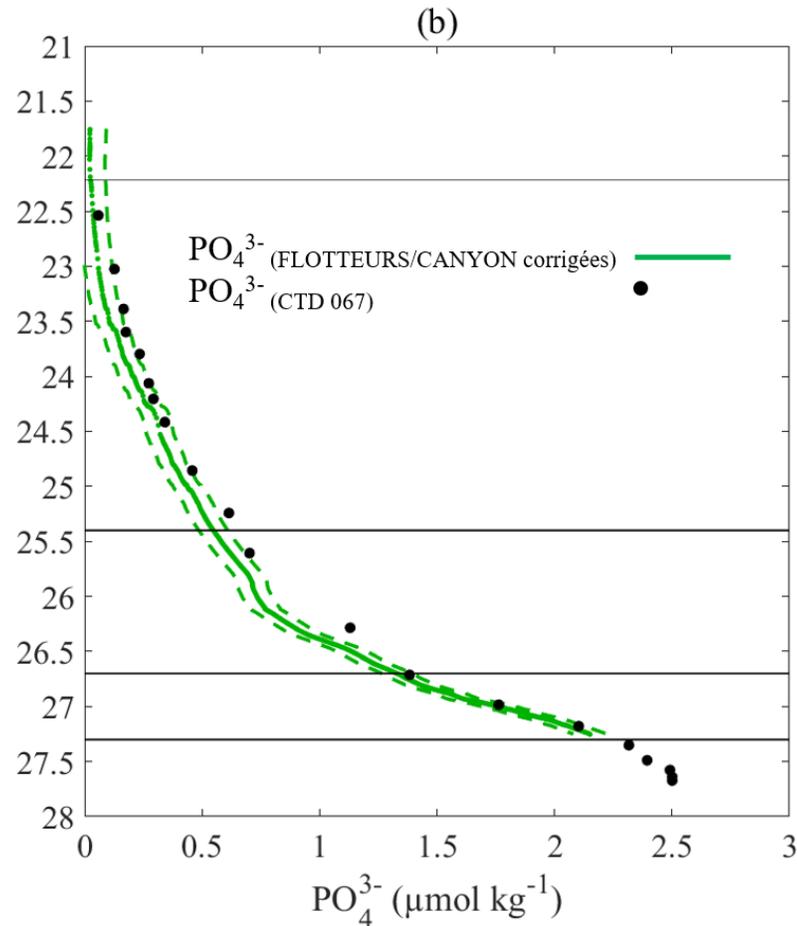
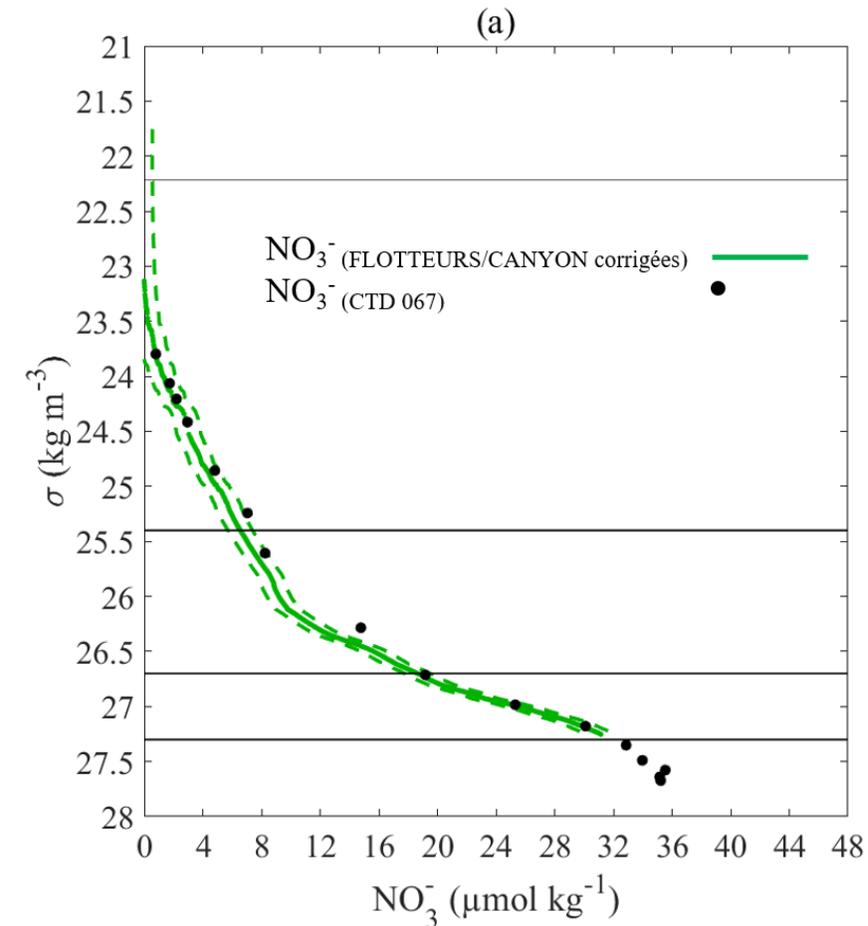
**Réseau de neurones
entraînés par le jeu de
donnée GLODAP_v2**

1^{er} étape : test réseau de neurones dans notre région ?
Valide dans notre région

2^{em} étape: estimation des $[\text{NO}_3^-]$ avec les données de flotteurs

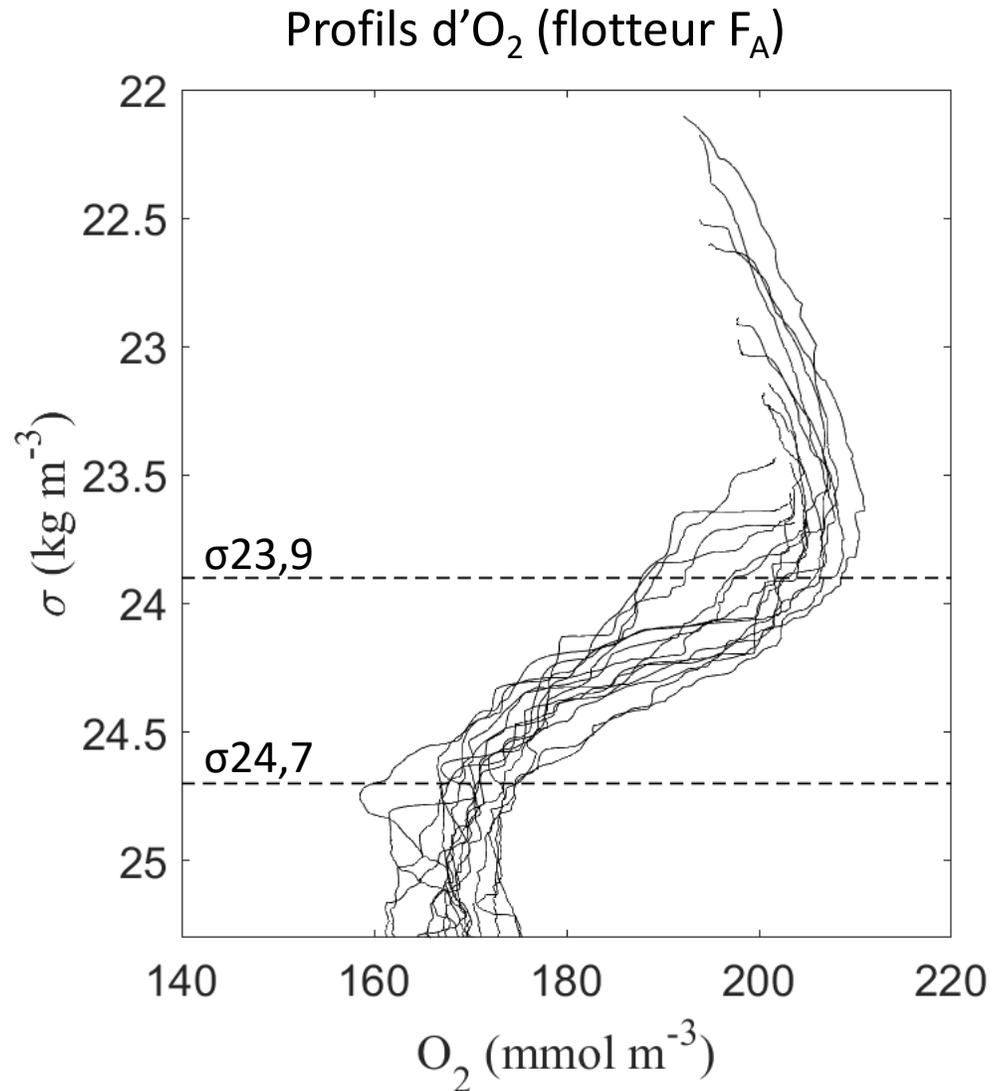
Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec le réseau de neurones CANYON-B (Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018)

Comparaison entre les $[\text{NO}_3^-]$ et $[\text{PO}_4^{3-}]$ CANYON-B obtenues à partir des mesures du 1^{er} profil du flotteur FA et les concentrations *in situ* mesurées à la station LDA



➤ Bonne adéquation entre les $[\text{NO}_3^-]$ et $[\text{PO}_4^{3-}]$ CANYON-B et les concentrations mesurées *in situ*

➤ Bonne performance du réseau de neurones



Entre Juillet 2016-Janvier 2017

Entre $\sigma_{23,7-23,8}$ et $\sigma_{23,9}$

→ Gradient [O₂] ≈ 0

→ Diffusion négligeable

Entre $\sigma_{24,7}$ et $\sigma_{24,9}$

→ Gradient [O₂] ≈ 0

→ Diffusion négligeable