



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

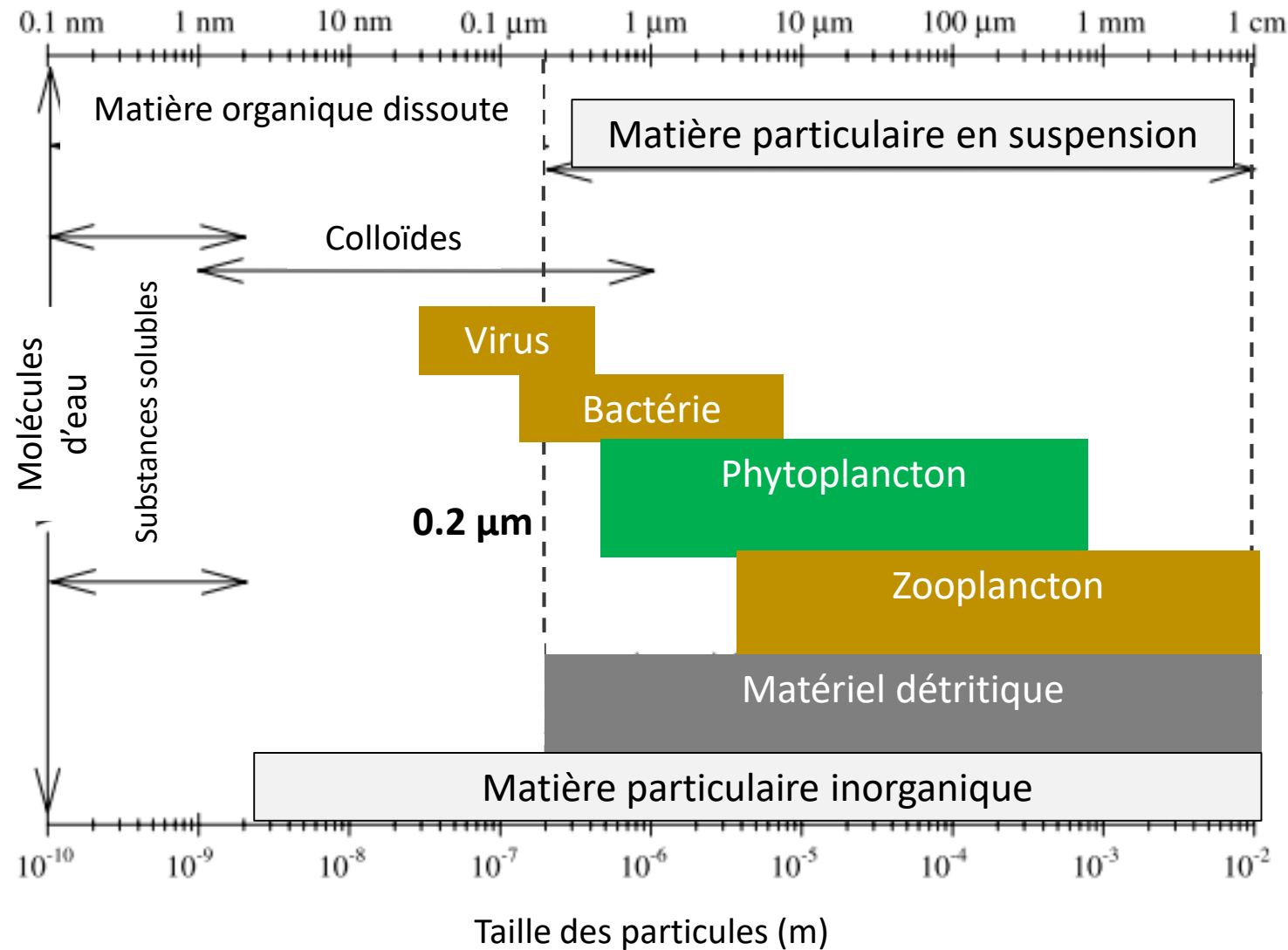
Couche non éclairée
Voir manuscrit de thèse

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

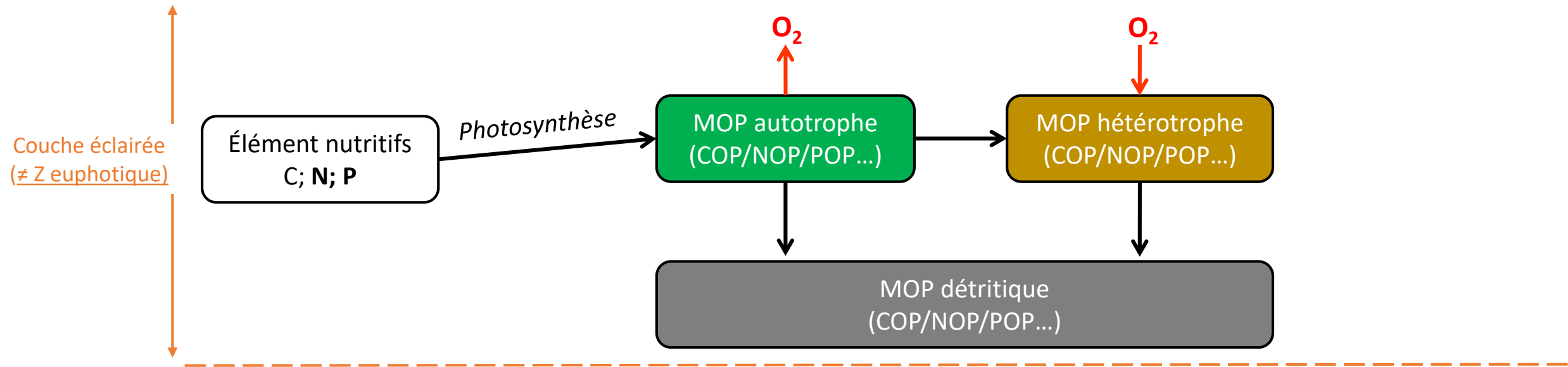
Etc...

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)

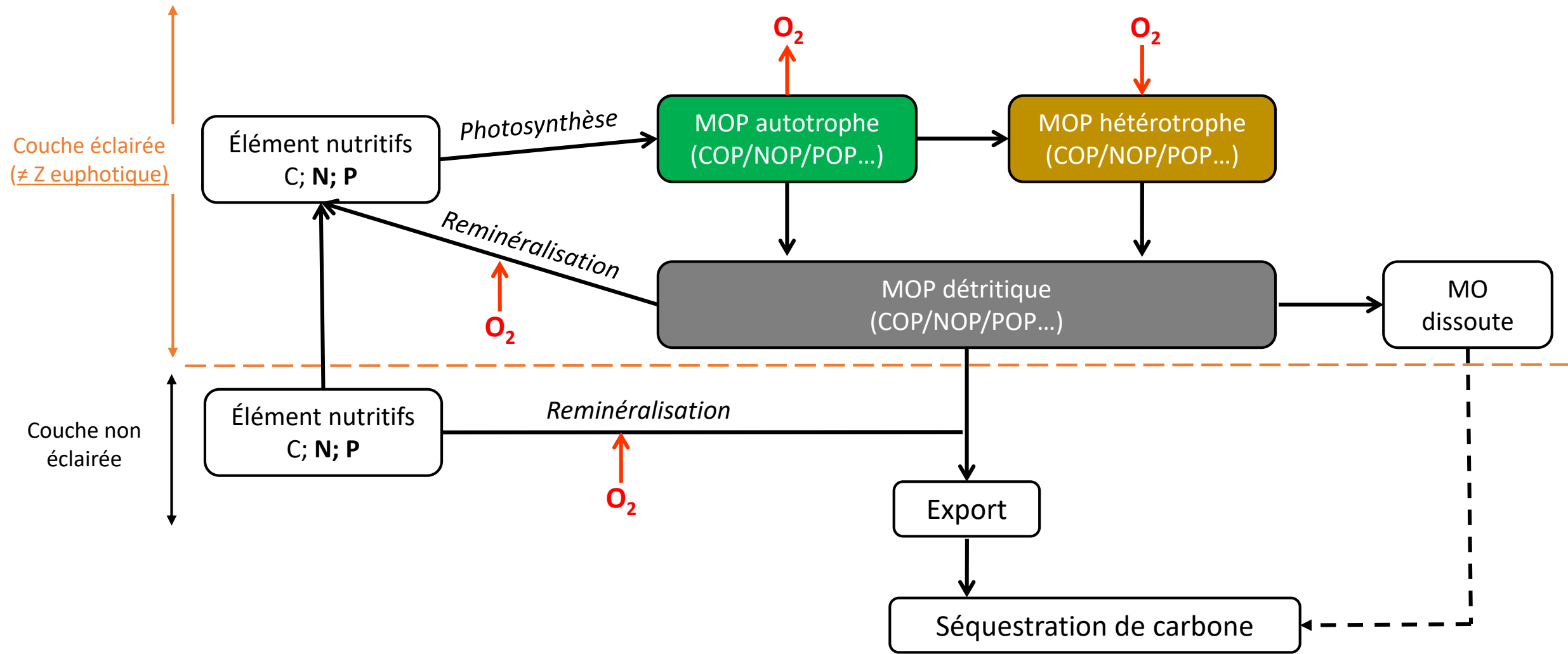
Production secondaire



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

Sources = Production primaire (photosynthèse)
Production secondaire

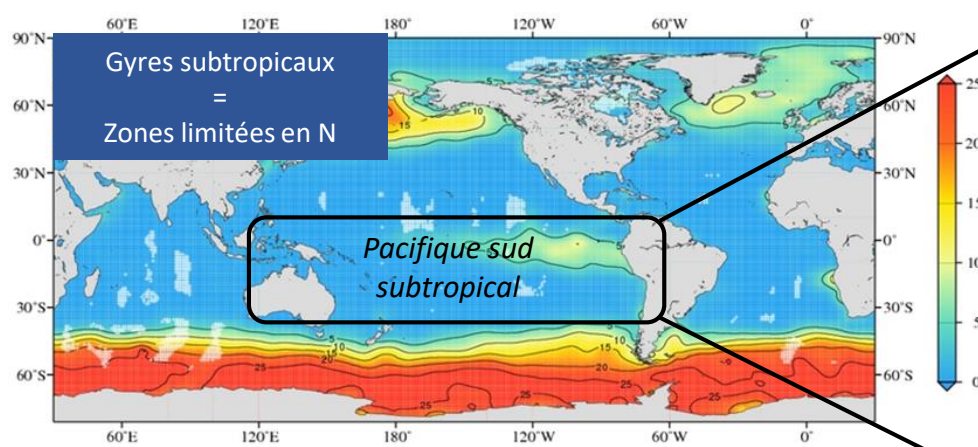
Pertes = Reminéralisation, transfert dissous, export



1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

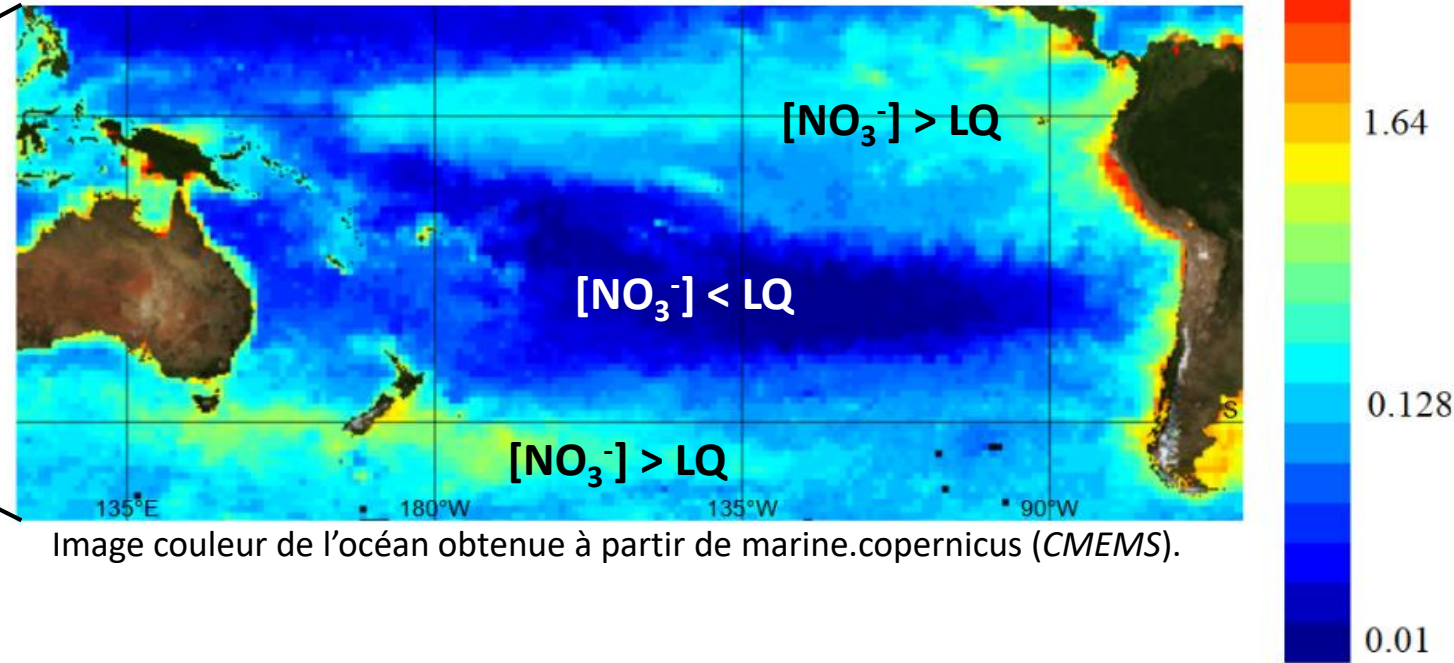
L'océan Pacifique sud subtropical, un désert océanique (Morel et al., 2010)

$[\text{NO}_3^-]$ dans les eaux de surface
(World Ocean Atlas 2013)



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

$[\text{Chl}a]$ de surface (mars 2018)

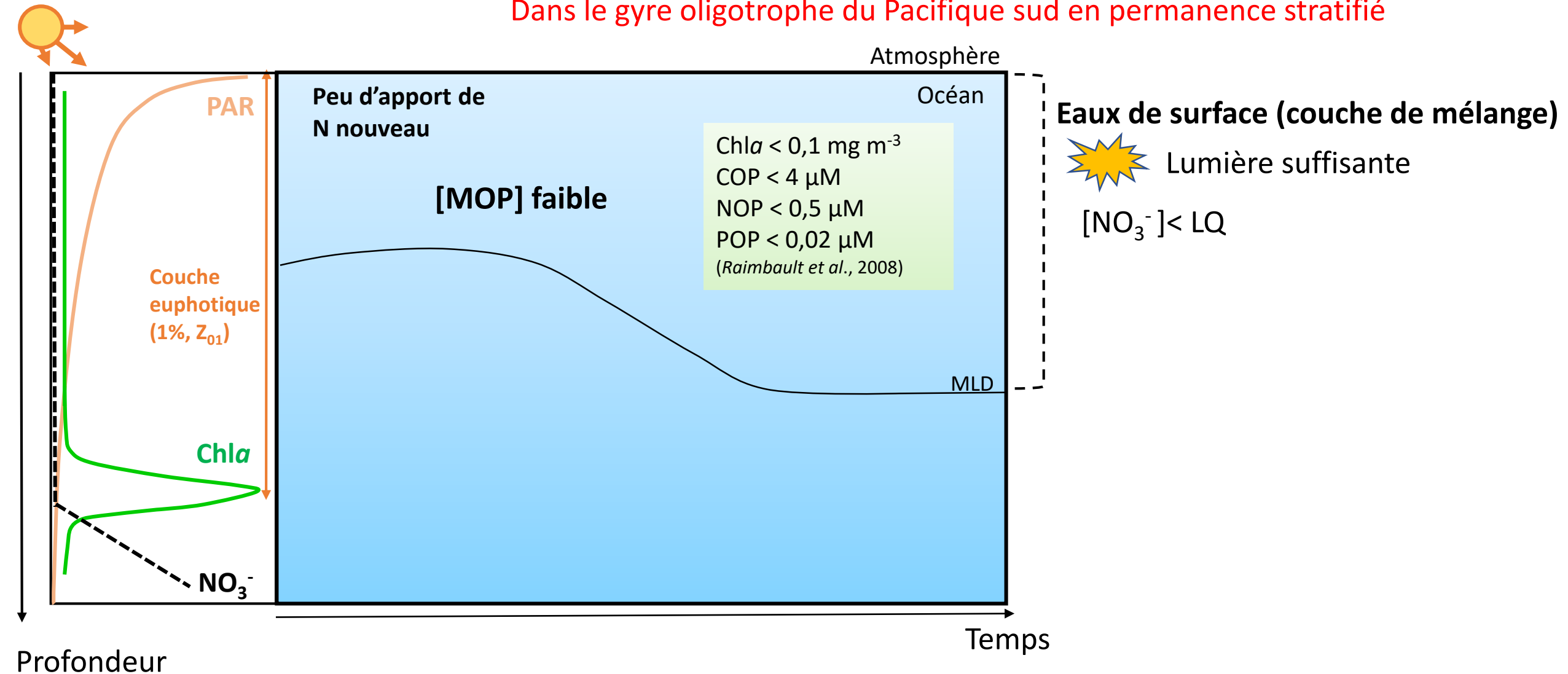


Gyre du Pacifique sud **oligotrophe**
= vaste zone d'un **bleu profond** reflétant une très faible activité biologique

1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

L'océan Pacifique sud subtropical, deux systèmes phytoplanctoniques

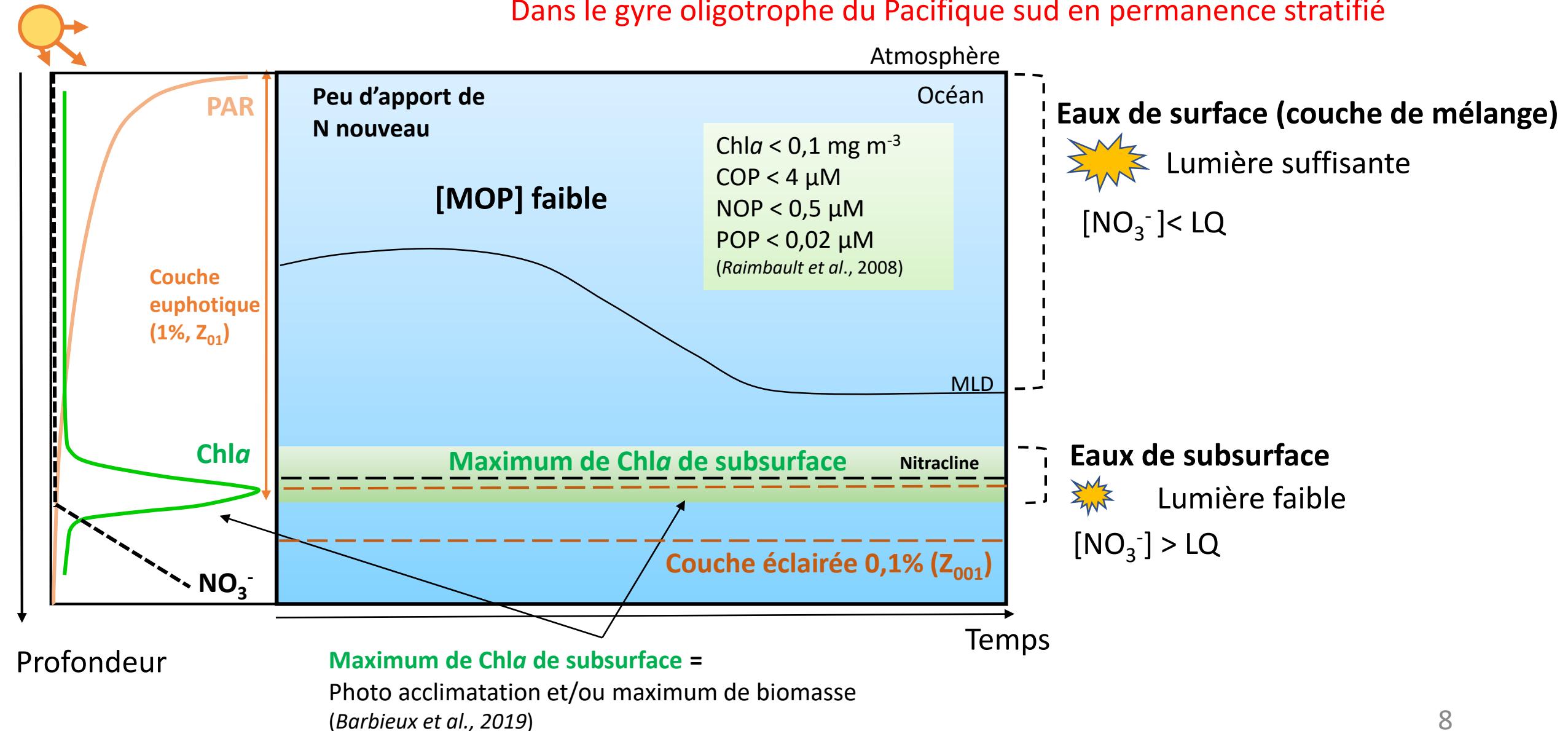
Dans le gyre oligotrophe du Pacifique sud en permanence stratifié



1- INTRODUCTION : La biogéochimie des régions oligotrophes subtropicales

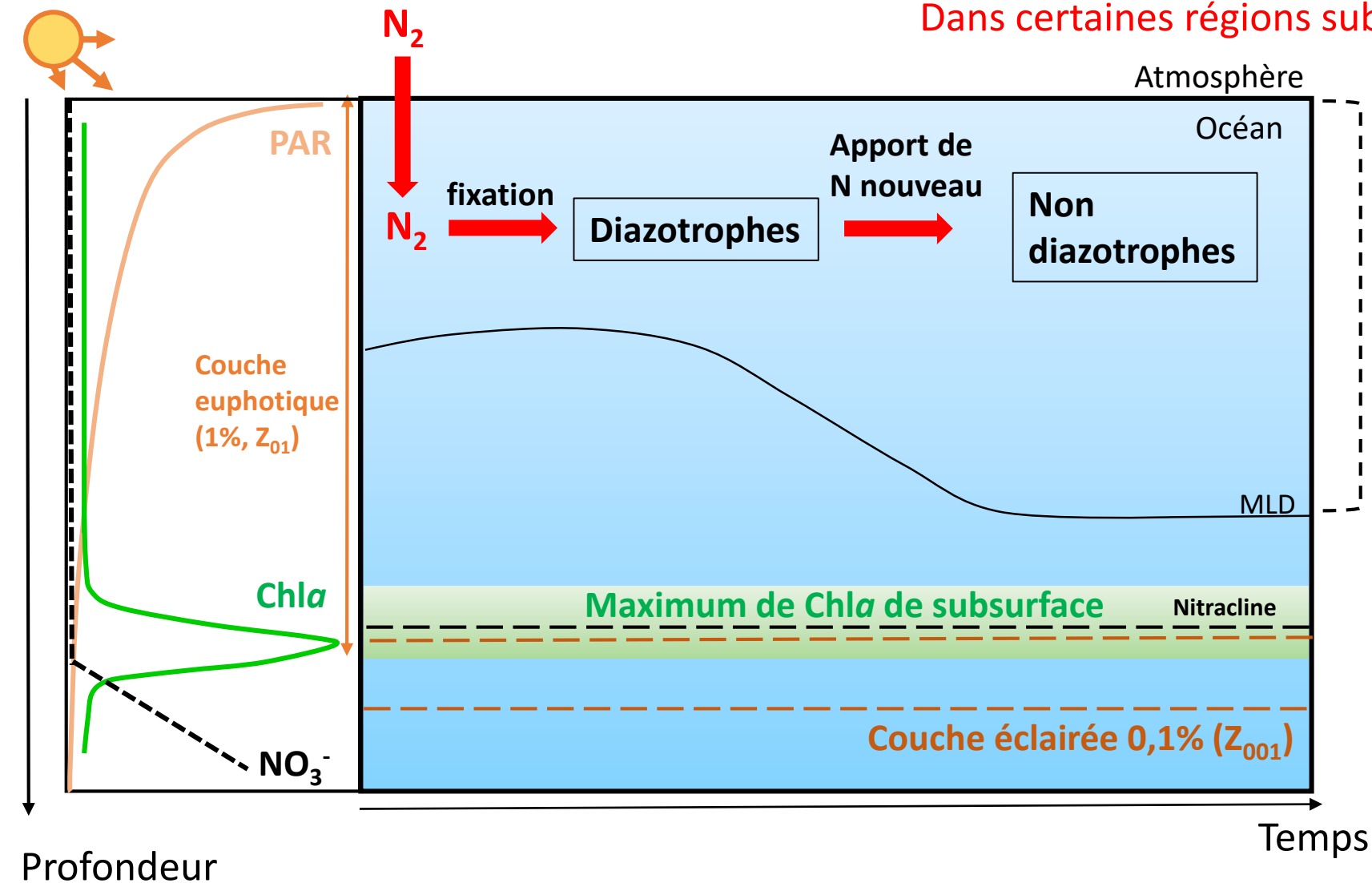
L'océan Pacifique sud subtropical, deux systèmes phytoplanctoniques

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:

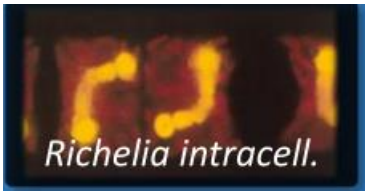


Photo d'efflorescence de diazotrophes pendant la campagne OUTPACE dans le WTSP (mars/avril 2015)

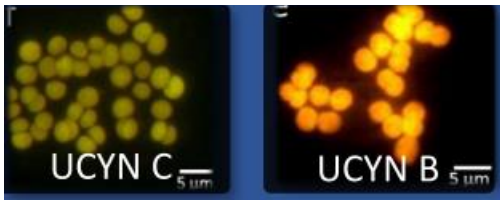
Filamenteux



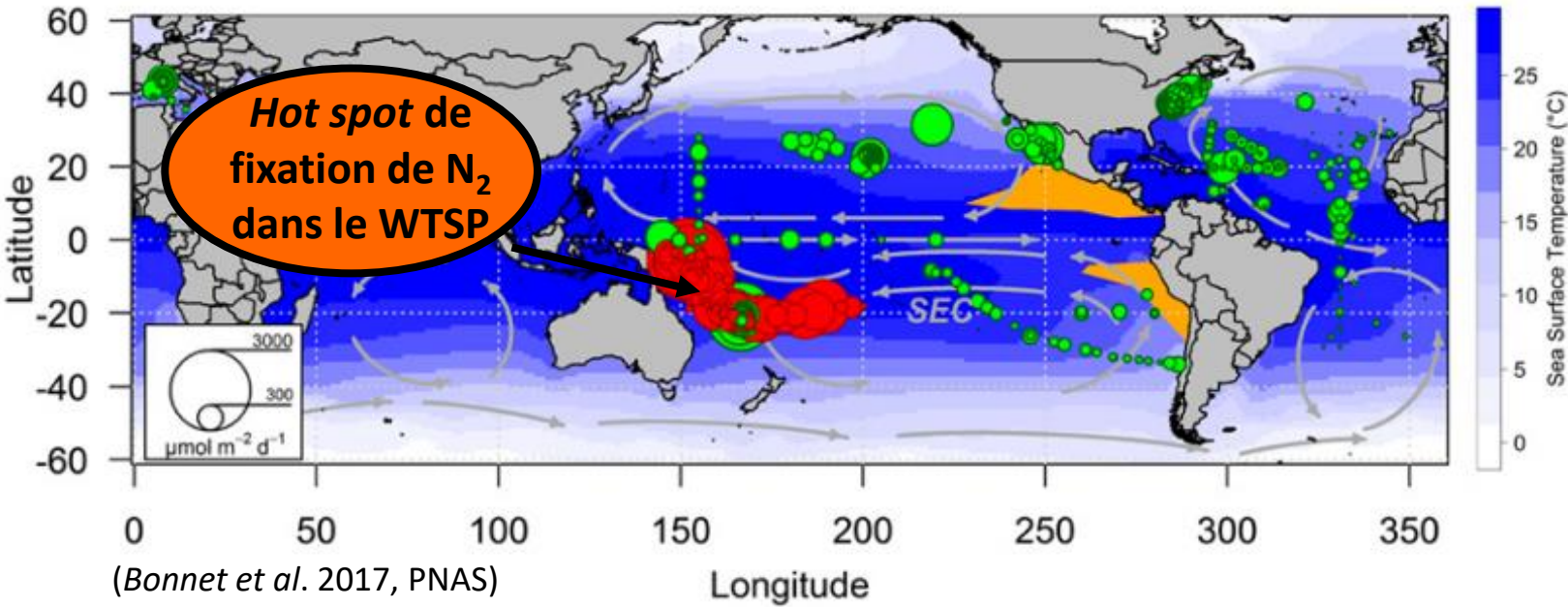
Symbiotique



Unicellulaire



Taux de fixation de N₂ (µmol m⁻² j⁻¹)



Fixation de N₂ dans le « hot spot » du WTPS
= 570 µmol N m⁻² 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 ?

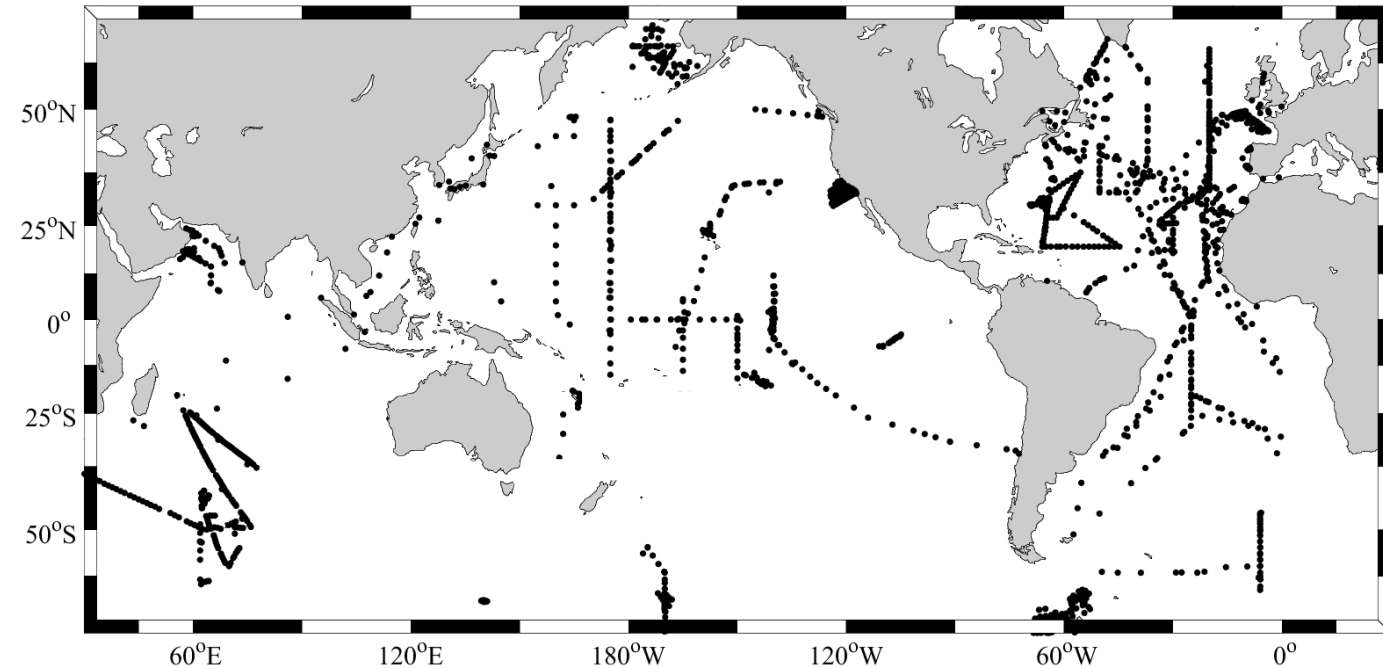
1- INTRODUCTION : Acquisition de données

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

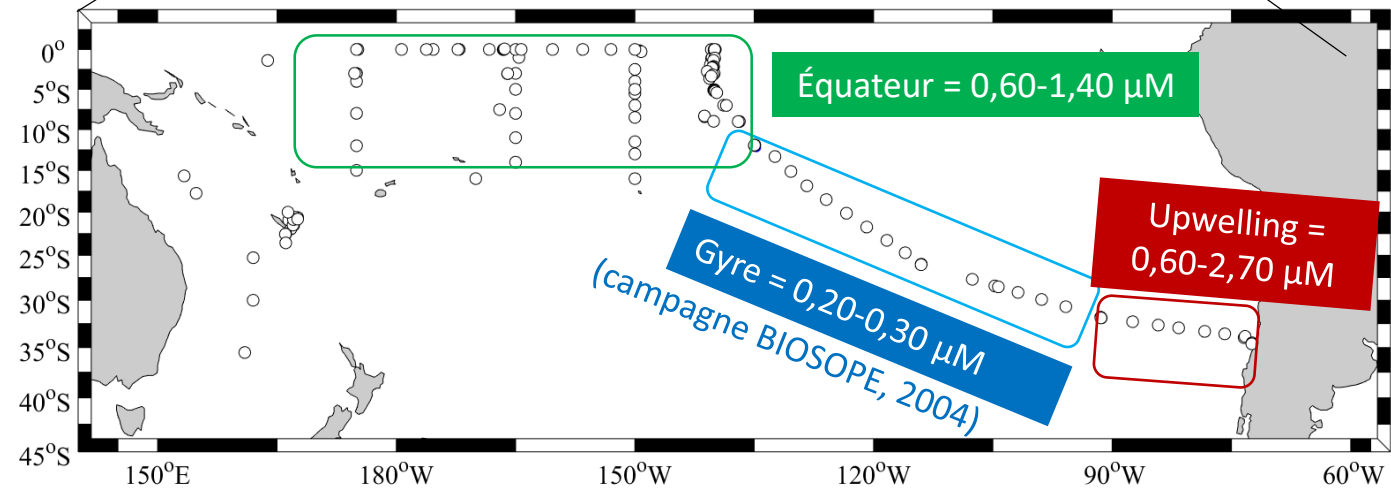
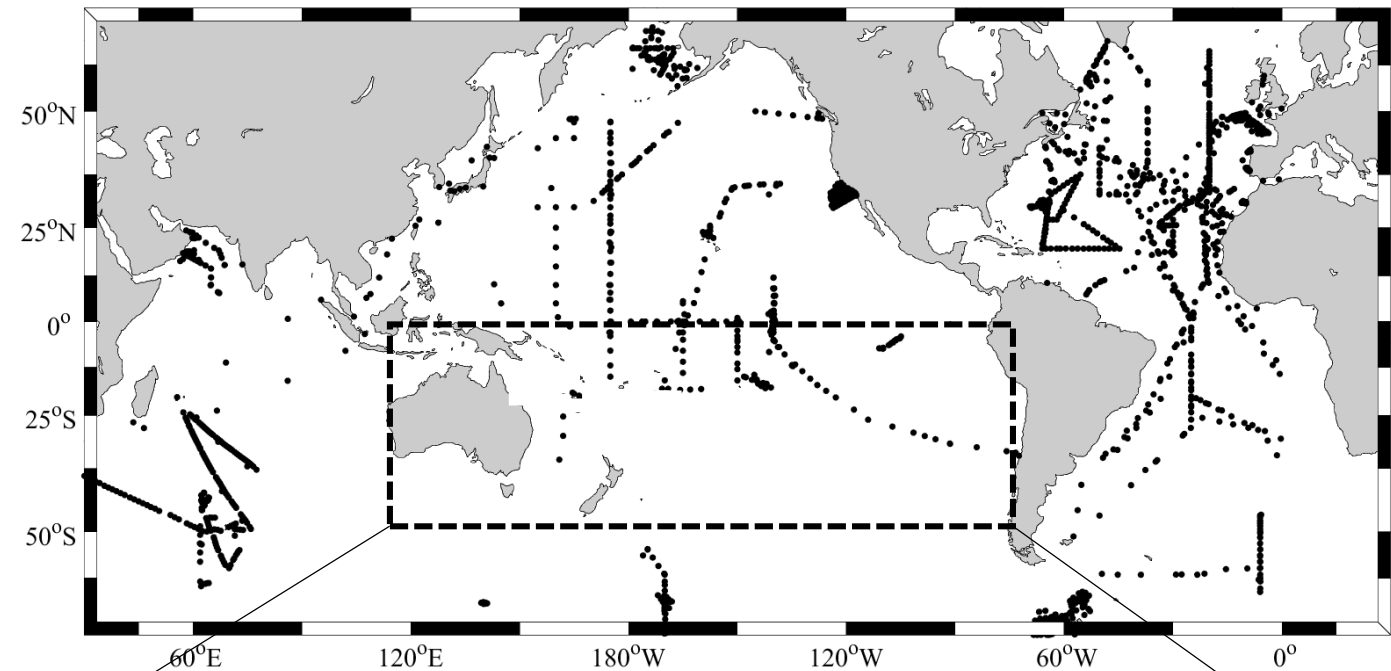
→ NOP et POP, utilisation de la méthode
d'oxydation humide

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

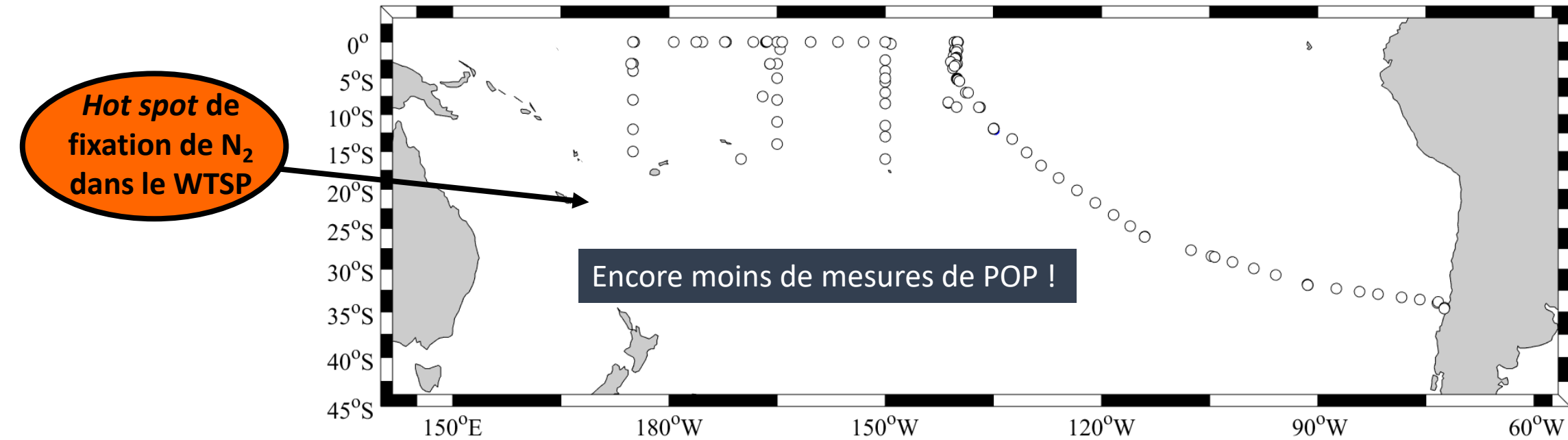


Mesures de NOP dans l'océan

(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

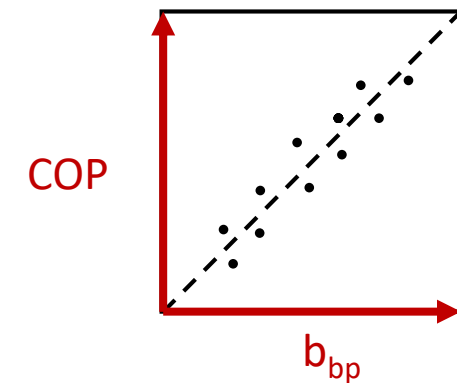
= Propriété Optique Inhérente (IOP)

= 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

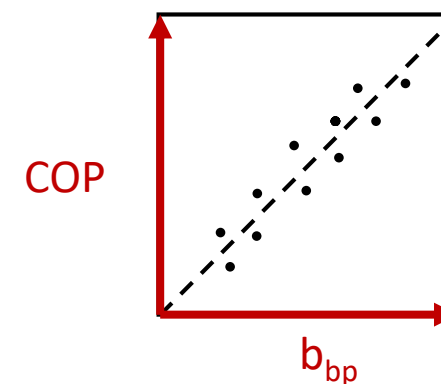
Relation entre le b_{bp} et COP

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)



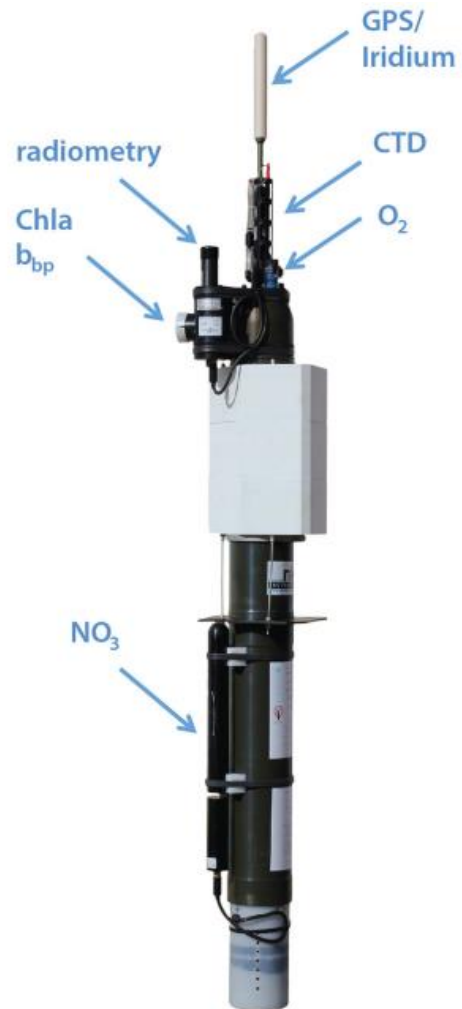
1. Quelle est la dynamique de la MOP dans les eaux de surface de la région inexplorée du WTSP soumise à une intense fixation de N_2 ?



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 ?

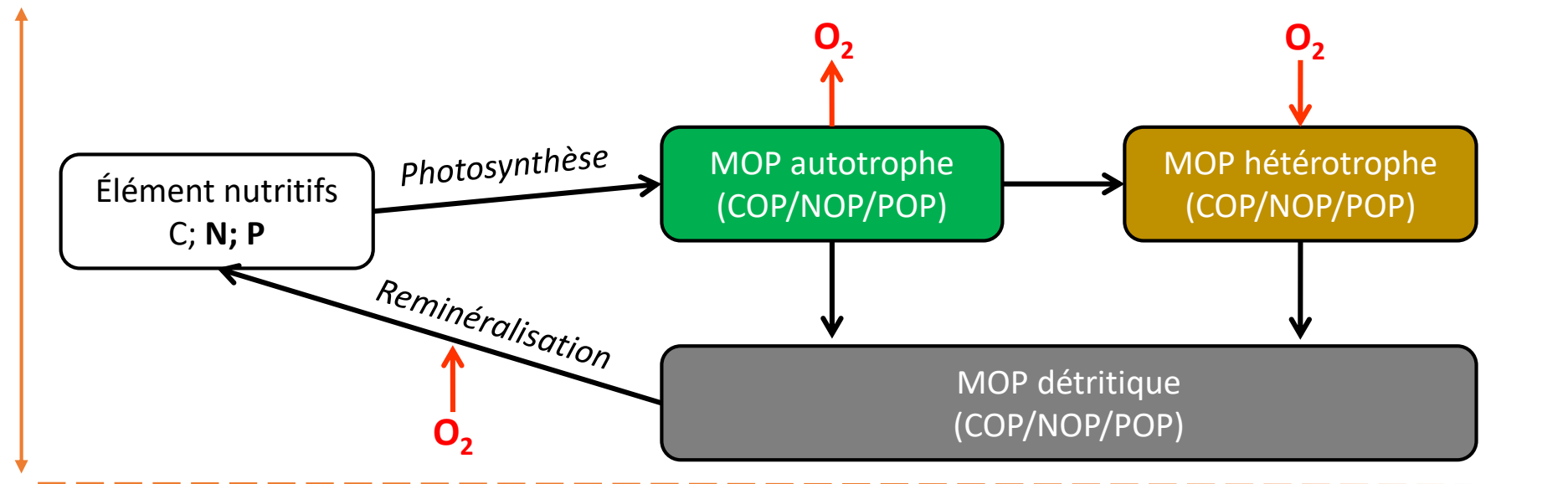
1- INTRODUCTION : Production communautaire nette

Mesures à l'aide de flotteurs *Biogeochemical Argo*



➤ O₂ = Permet de calculer la **Production Communautaire Nette (NCP)**
= BILAN NET

$$\text{NCP} = [\text{O}_2] \text{ produit par le phytoplancton} - [\text{O}_2] \text{ total respiré}$$



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



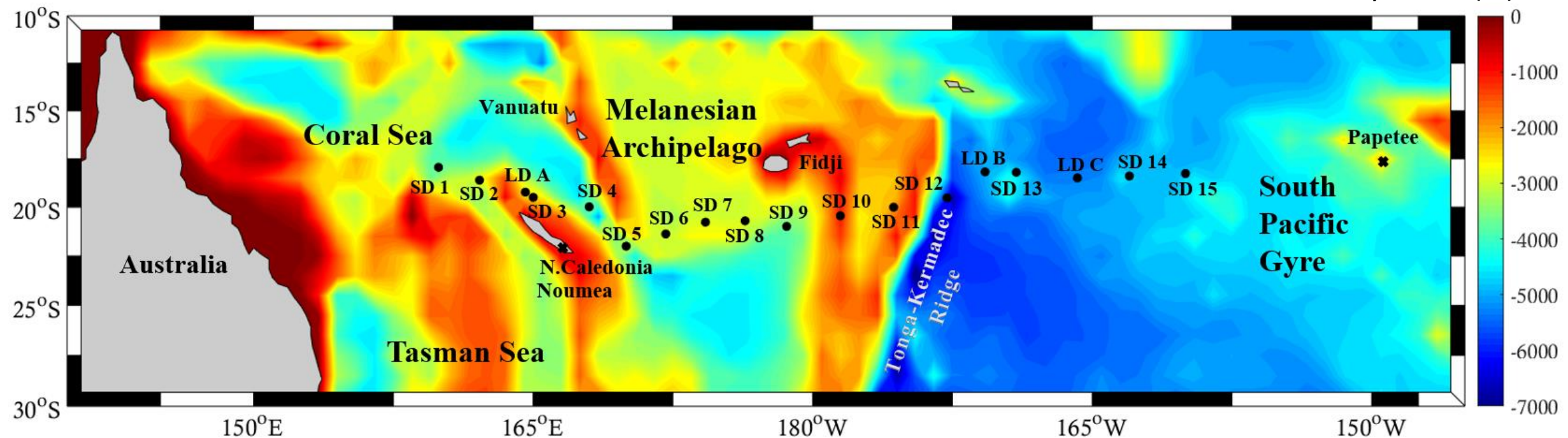
3. Quelle est la dynamique spatiale et temporelle de la MOP associée au maximum de Chl a de subsurface ?
Quelle est la NCP associée au maximum de Chl a de subsurface dans la zone peu éclairée située sous le 1% de lumière ?

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)



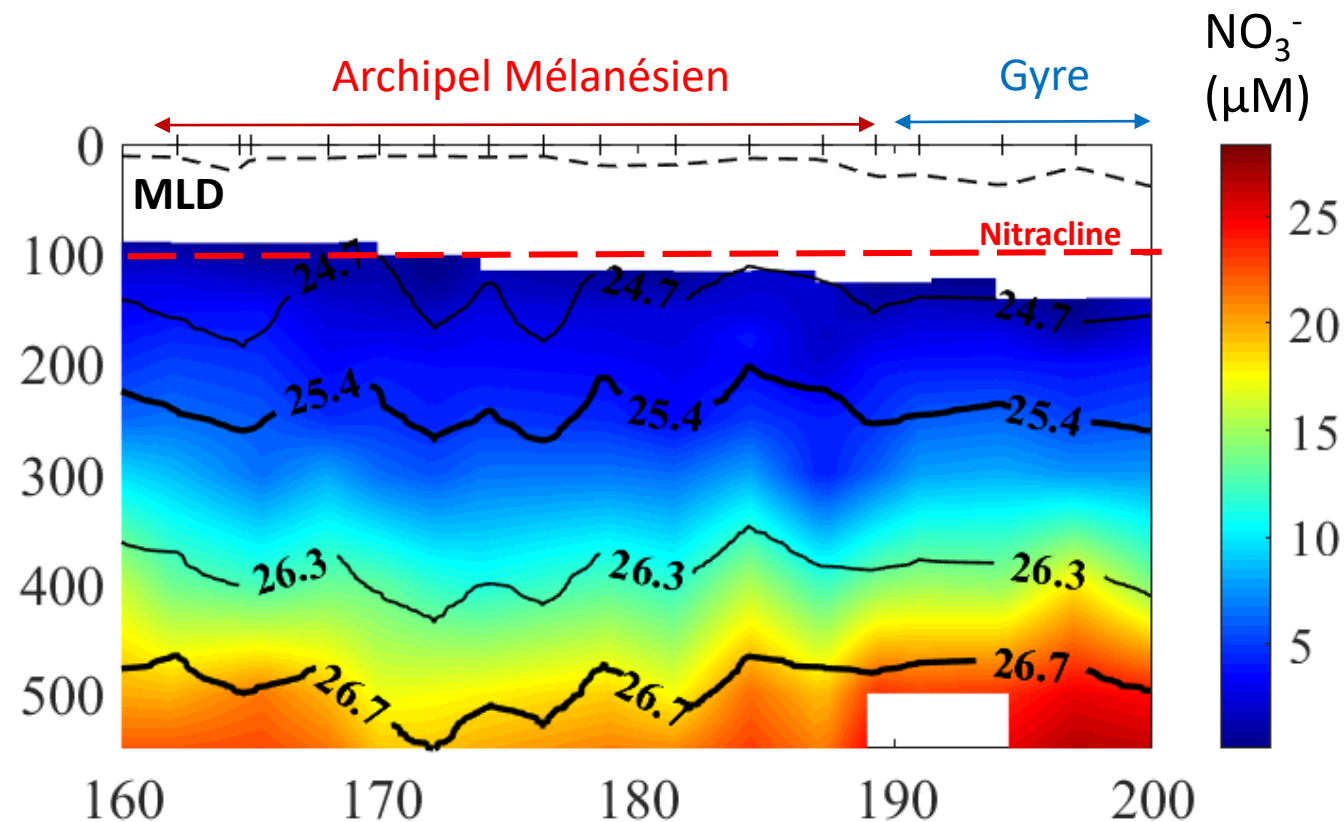
- 18 stations visitées
- Données disponibles : CTD, NO_3^- , PO_4^{3-} , COP, NOP, POP, O_2 , taux de fixation de N_2

- 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

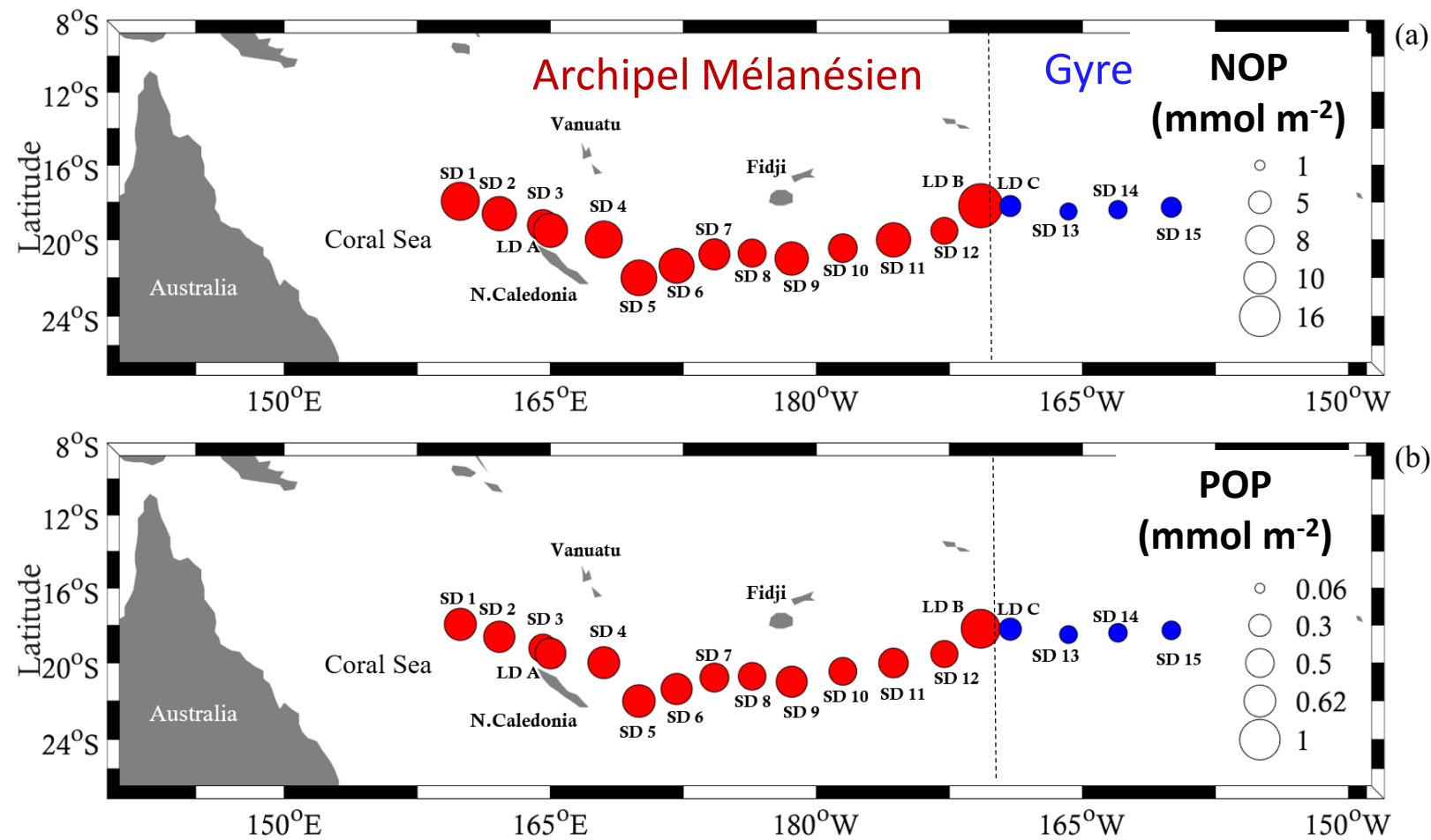


- [NO₃⁻] non quantifiables dans les 100^{er} m
- MLD = 25 m
- Nitracline = 90 m pendant la campagne
(Moutin et al., 2018)
- Pas d'apport verticaux de NO₃ par des processus de méso échelle (de Verneil et al., 2017)
- Dépôts atmosphériques de N négligeables
(Caffin et al., 2018)

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)



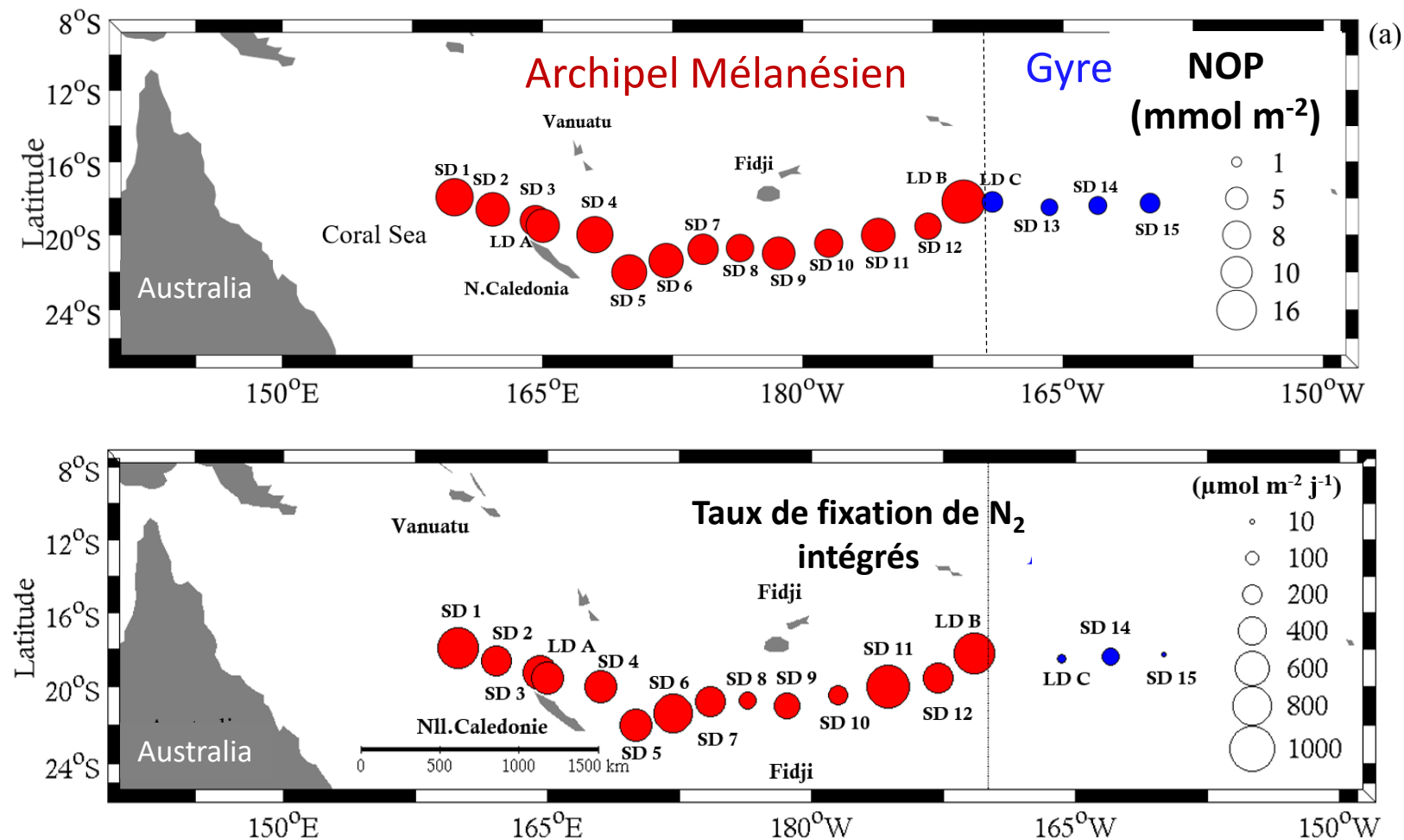
➤ $[\text{NO}_3^-] < \text{LQ}$ mais des stocks de MOP équivalent aux régions productives équatoriales riches en éléments nutritifs !

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)



➤ [NO₃⁻] < 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 (100-840 μmol N m⁻² j⁻¹)

➤ Valeurs très faibles dans les eaux du Gyre (5-73 μmol N m⁻² j⁻¹)

Liens entre les concentrations en NOP (POP) et la fixation de N₂ (R²=0,70; p<0,001)

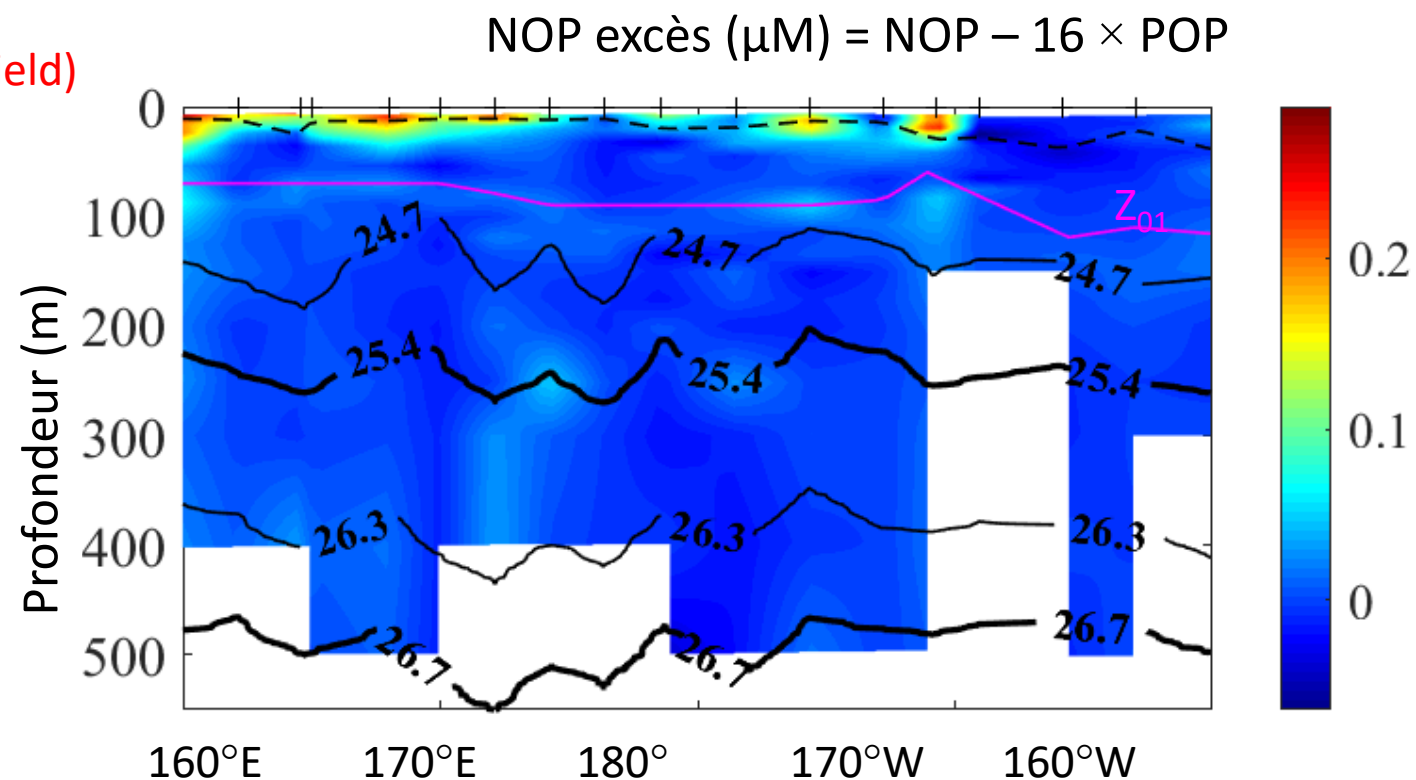
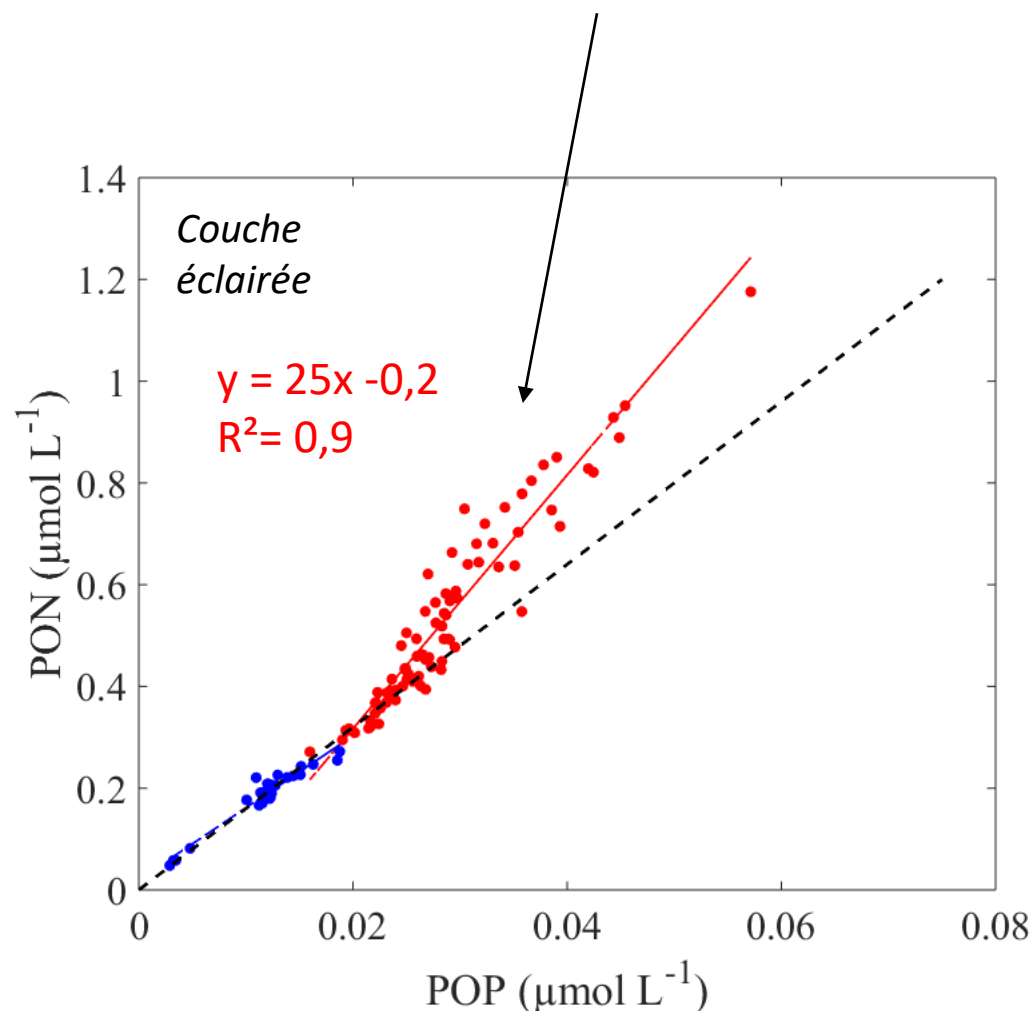
N₂ fixation = principale source possible de N capable de soutenir la production de MOP (pendant la campagne)

Moutin et al. (2018)

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

Impacts d'une intense fixation de N_2 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 N_2 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 ($R^2 = 0,86$, $p<0,001$)

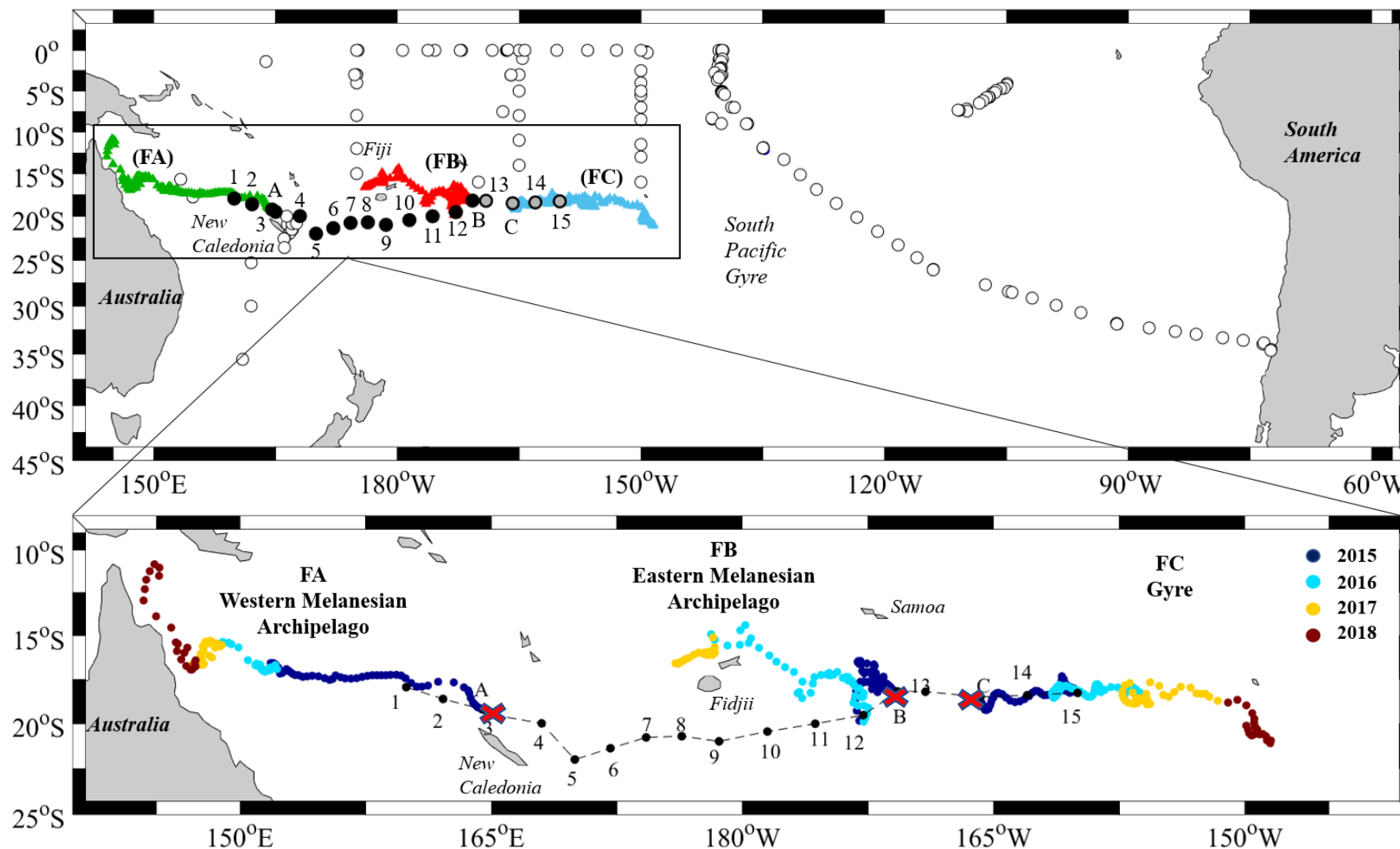
La fixation de N_2 = seule source possible d'azote capable de soutenir la production de MOP enrichie en azote (à l'échelle de temps de la campagne OUTPACE)

Et sur une échelle de temps saisonnière ?

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

Moyens disponibles

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



3 flotteurs BGC-Argo

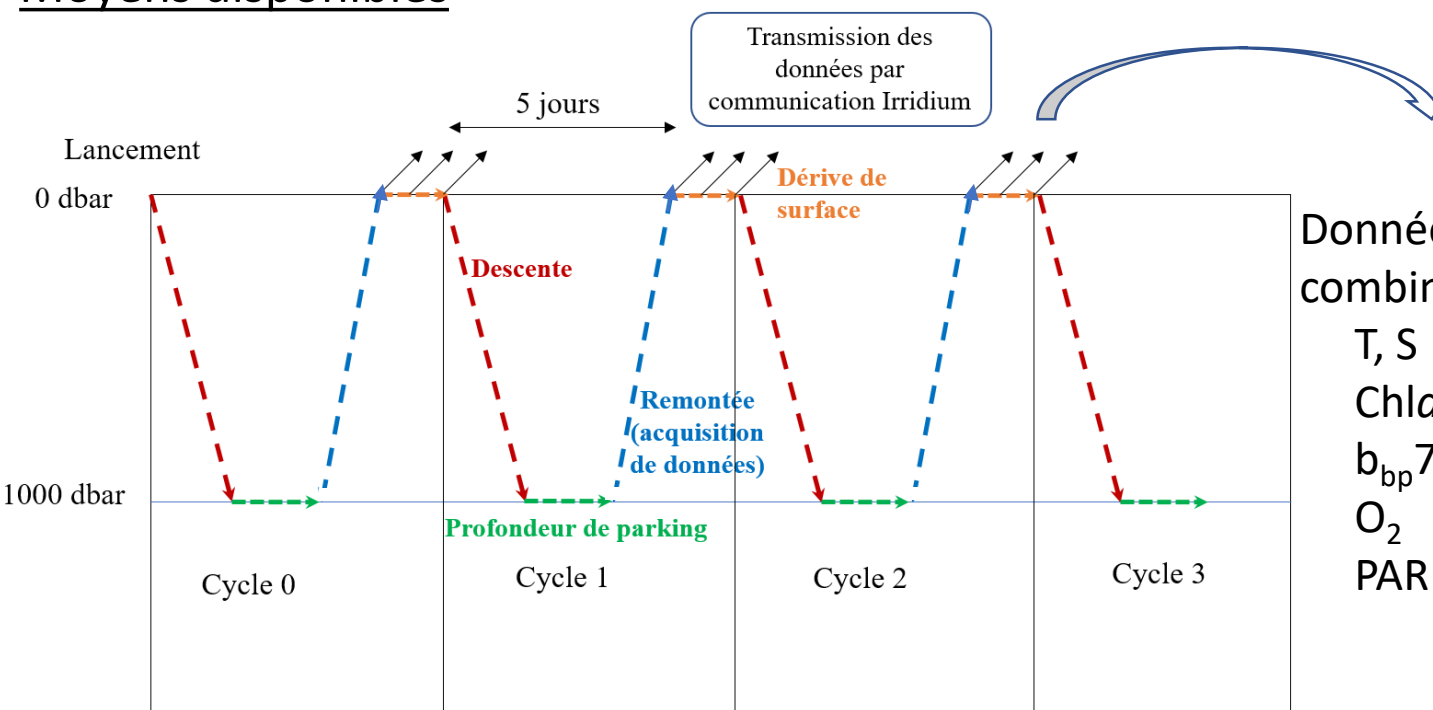
- LDA → flotteur F_A (vert)
- LDB → flotteur F_B (rouge)
- LDC → flotteur F_C (bleu)

~ 3 années de mesures
Mars 2015 → Juillet 2018

✗ = 1^{er} profils

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

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
O ₂	----->	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}

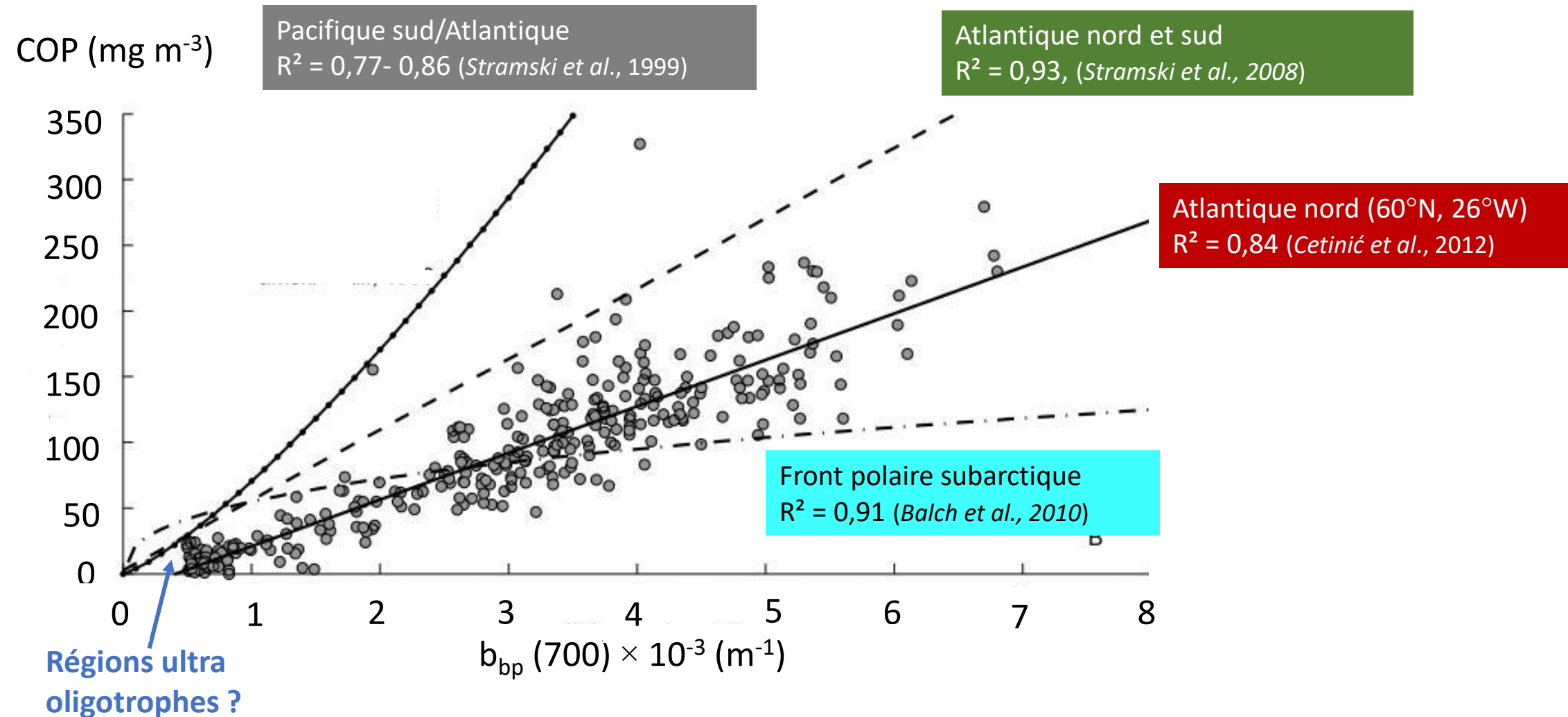
Travail réalisé pendant la thèse

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)

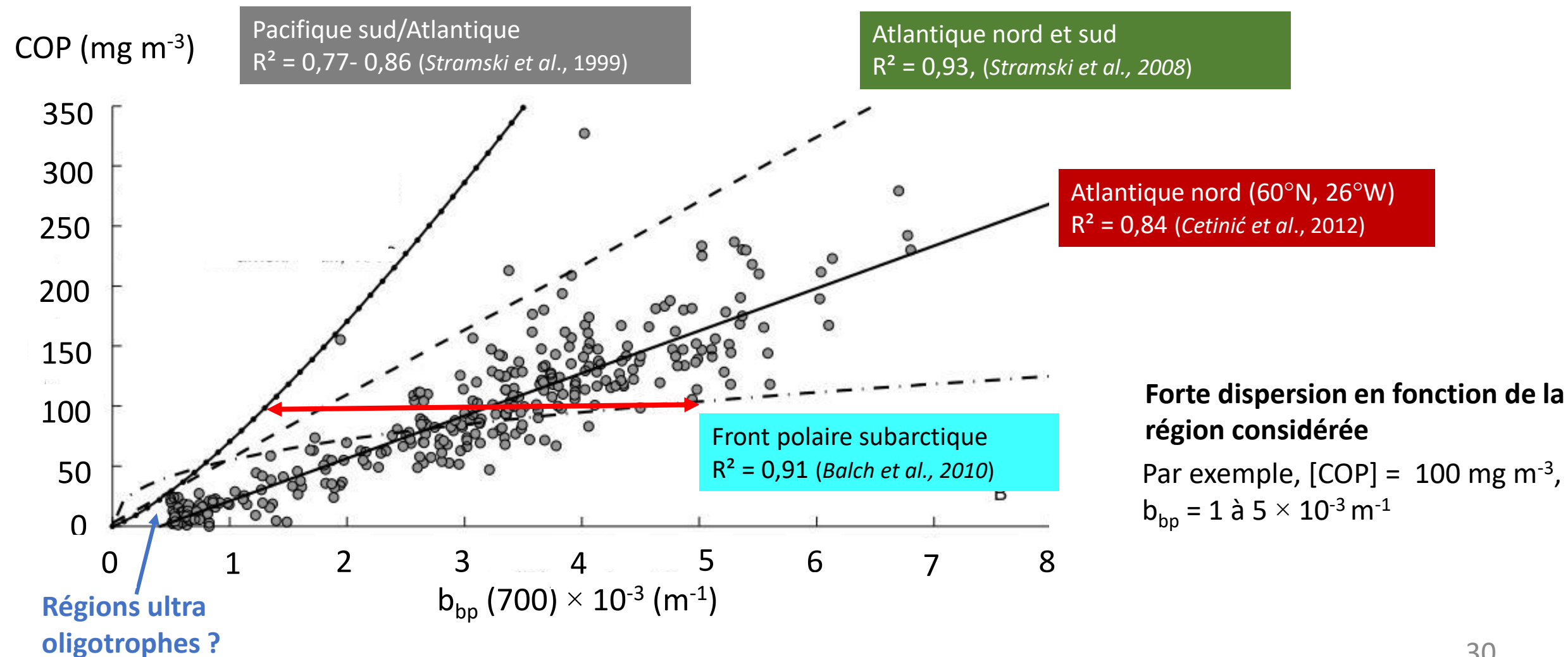


2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

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

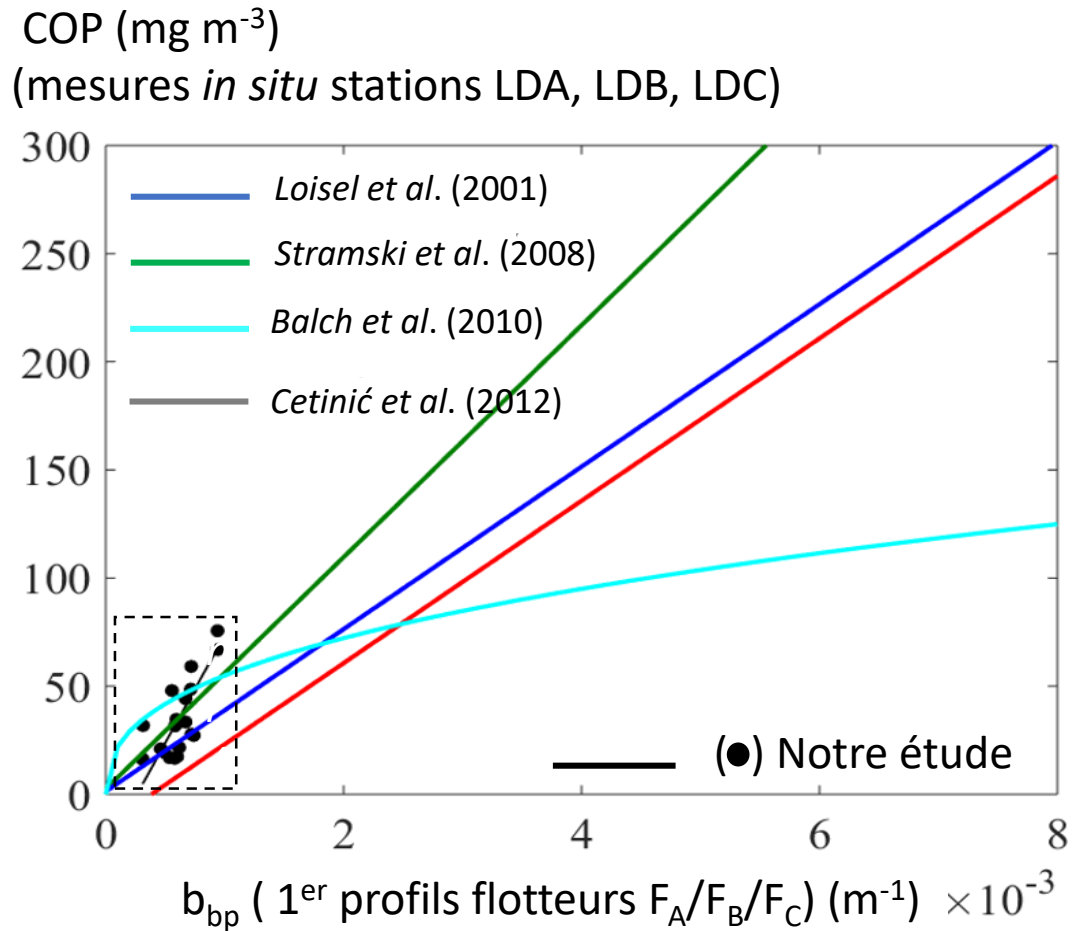
Relation b_{bp} vs COP dans la littérature

(Modifiée de *Cetinić et al.*, 2012)



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

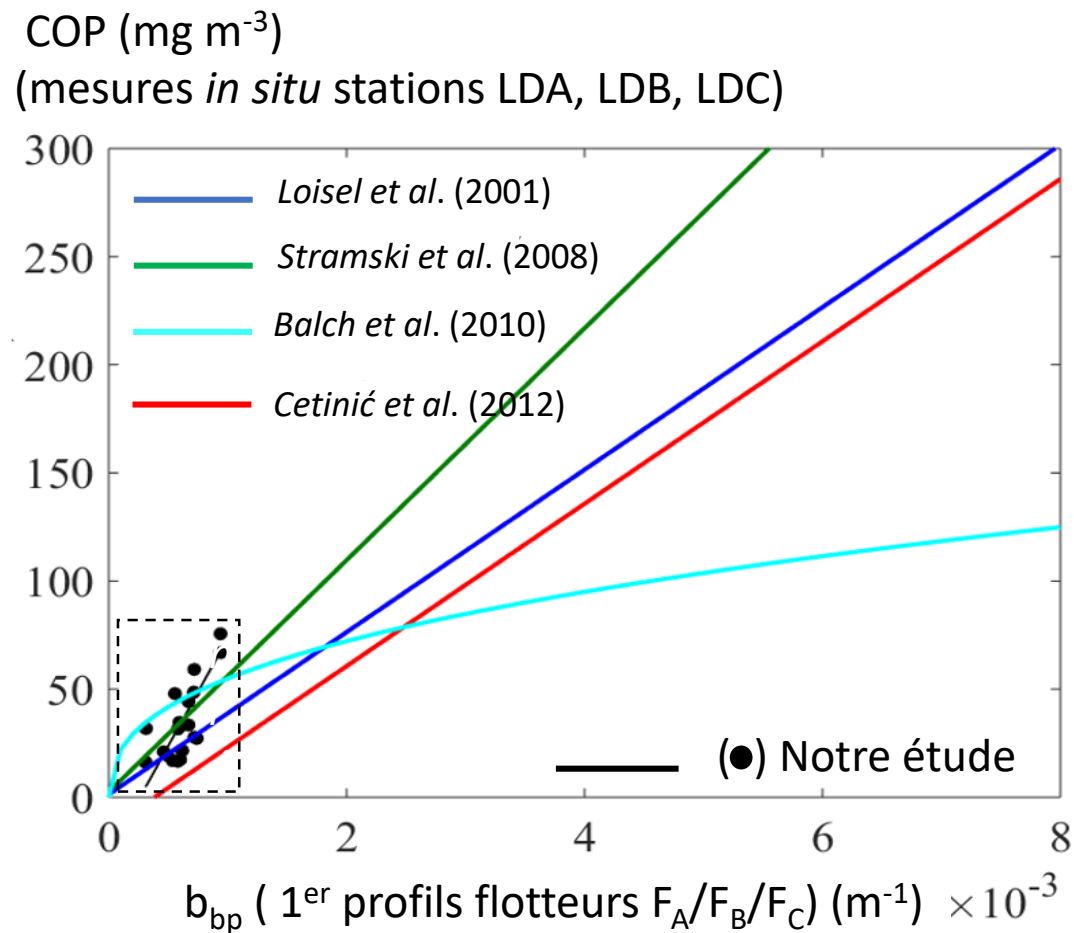
1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



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

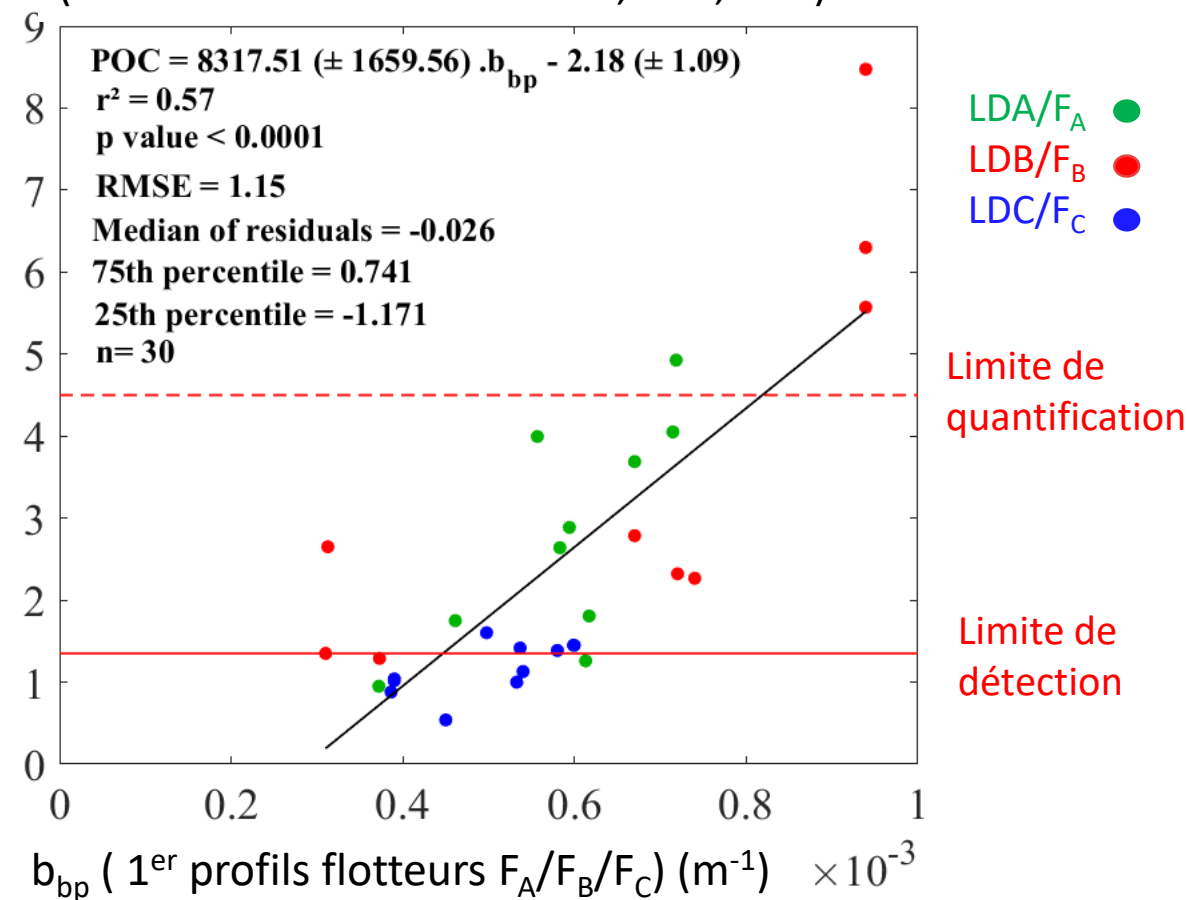
2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

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



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

COP (μM)
(mesures *in situ* stations LDA, LDB, LDC)

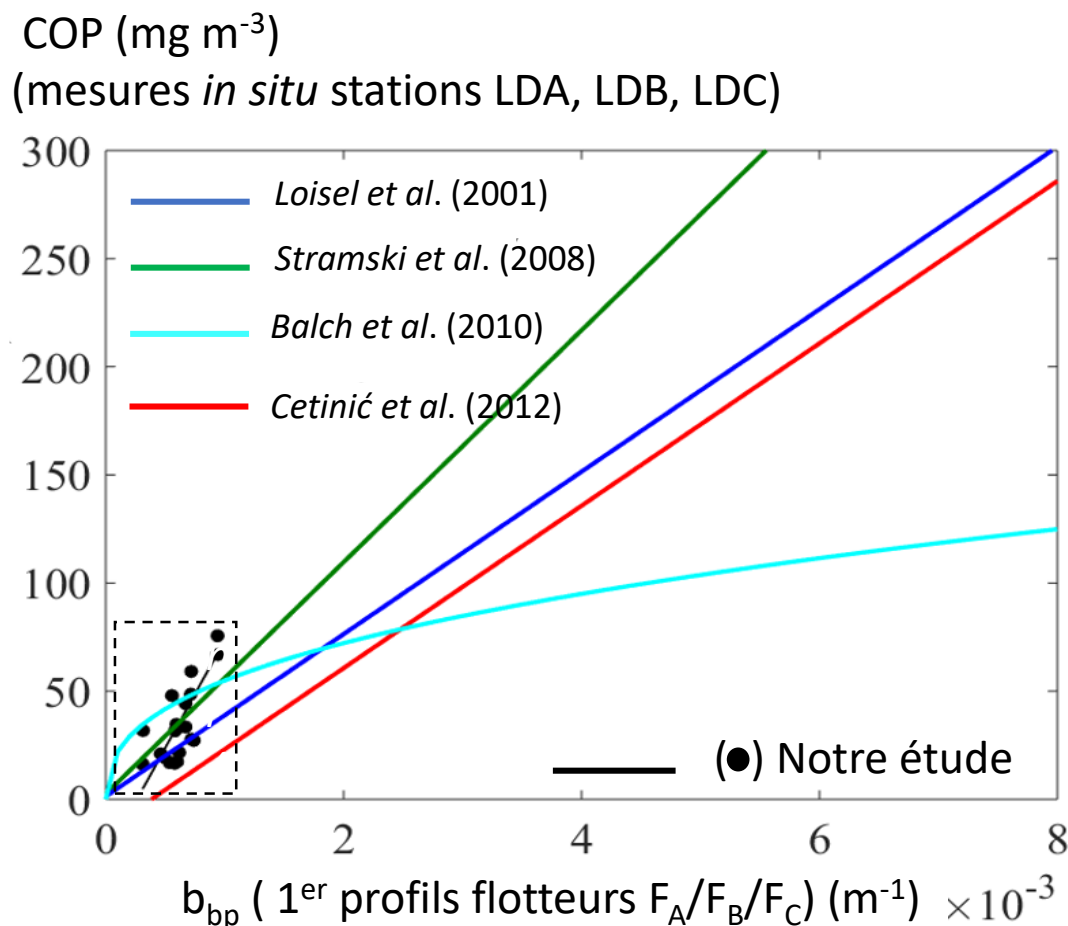


- Nombreuses données sous la LQ
➤ Forte dispersion
➤ Relation statistique moyenne

Besoin d'une
alternative !

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

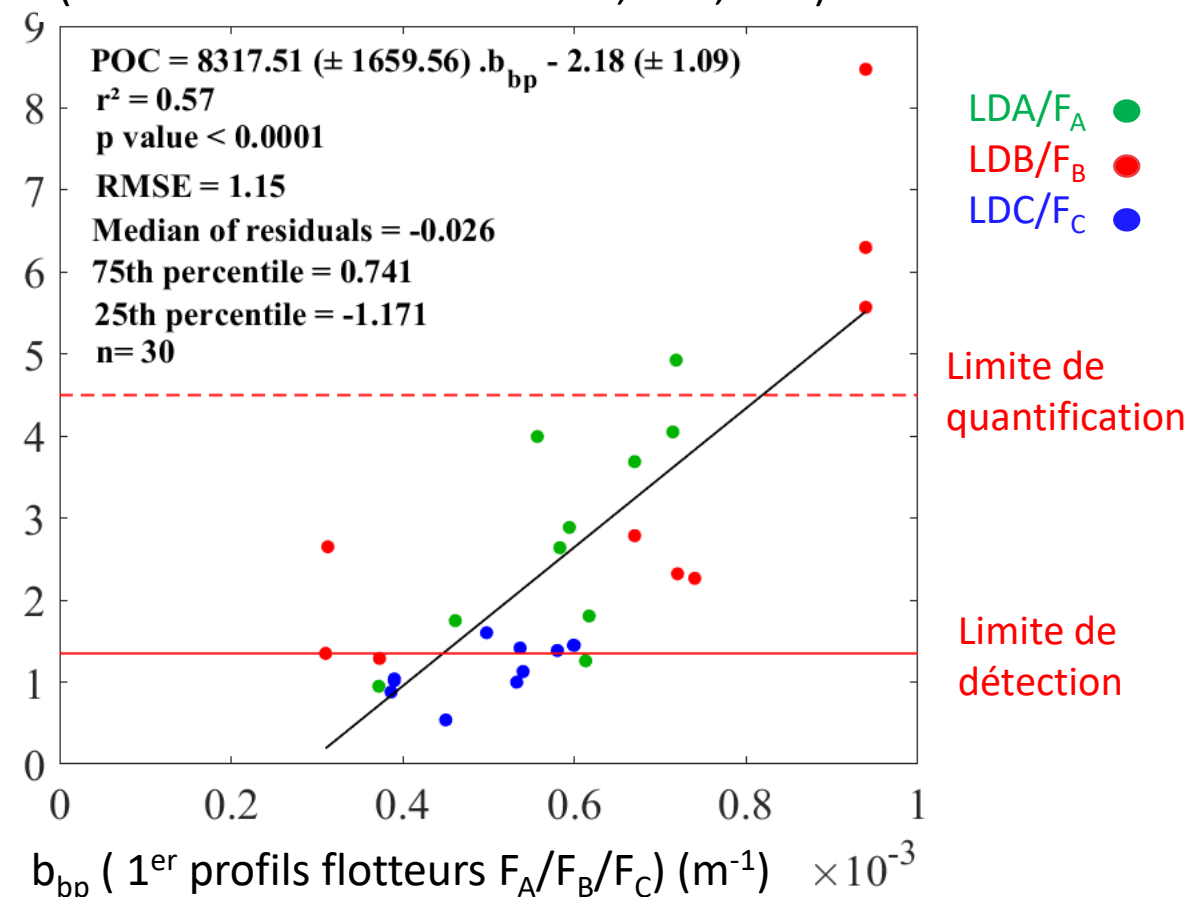
1^{er} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



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

COP (μM)
(mesures *in situ* stations LDA, LDB, LDC)

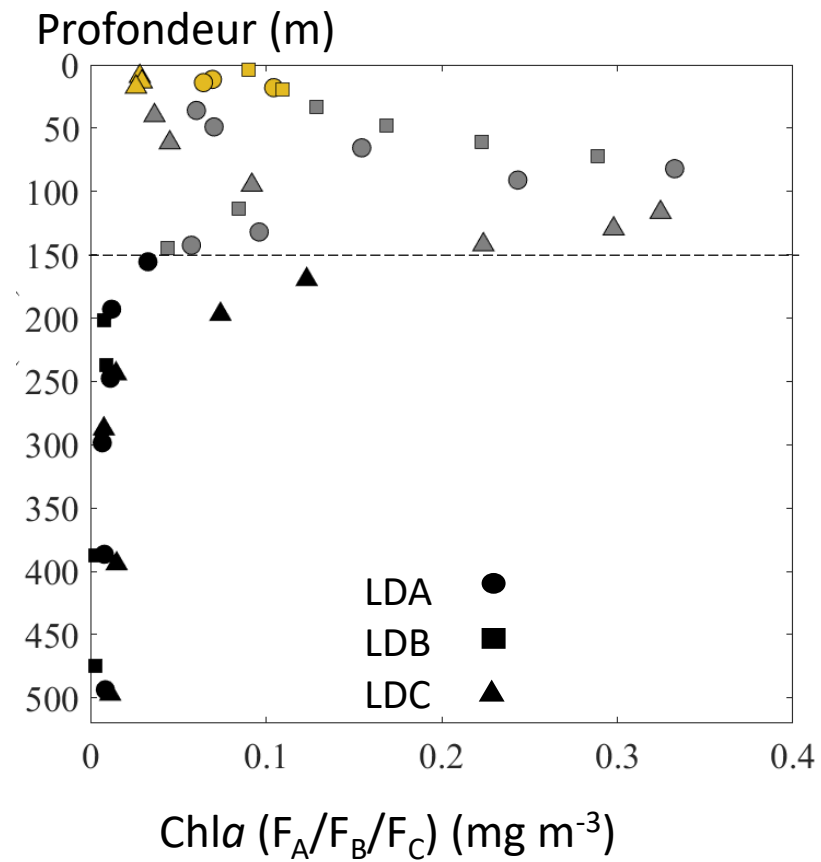


Proxys optiques du NOP et du POP ?



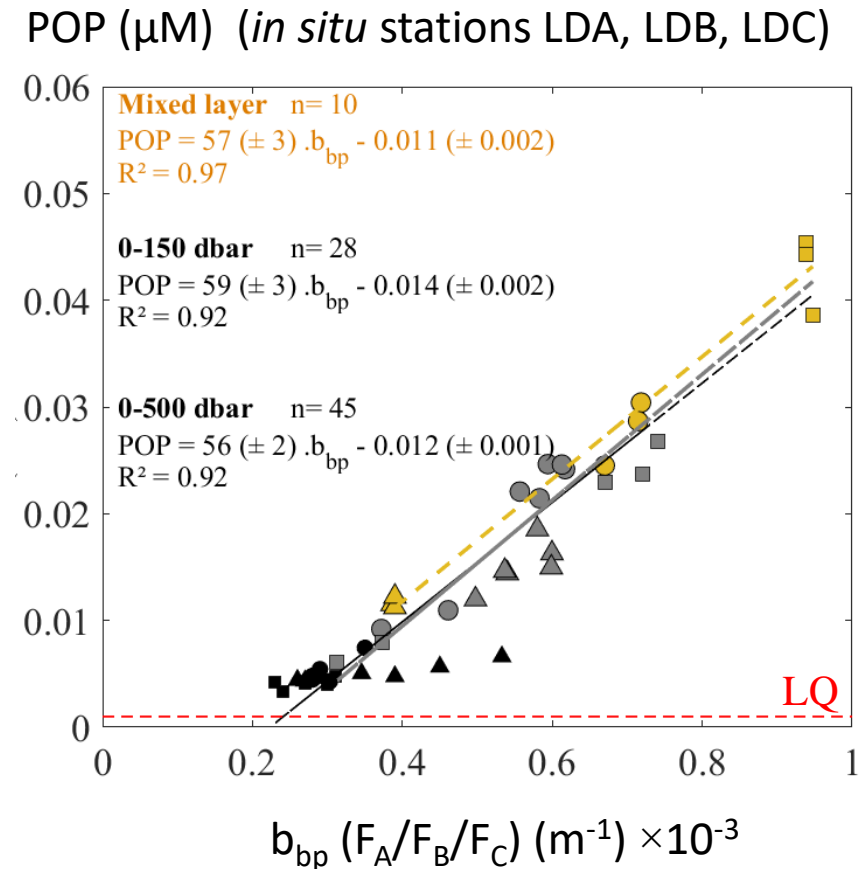
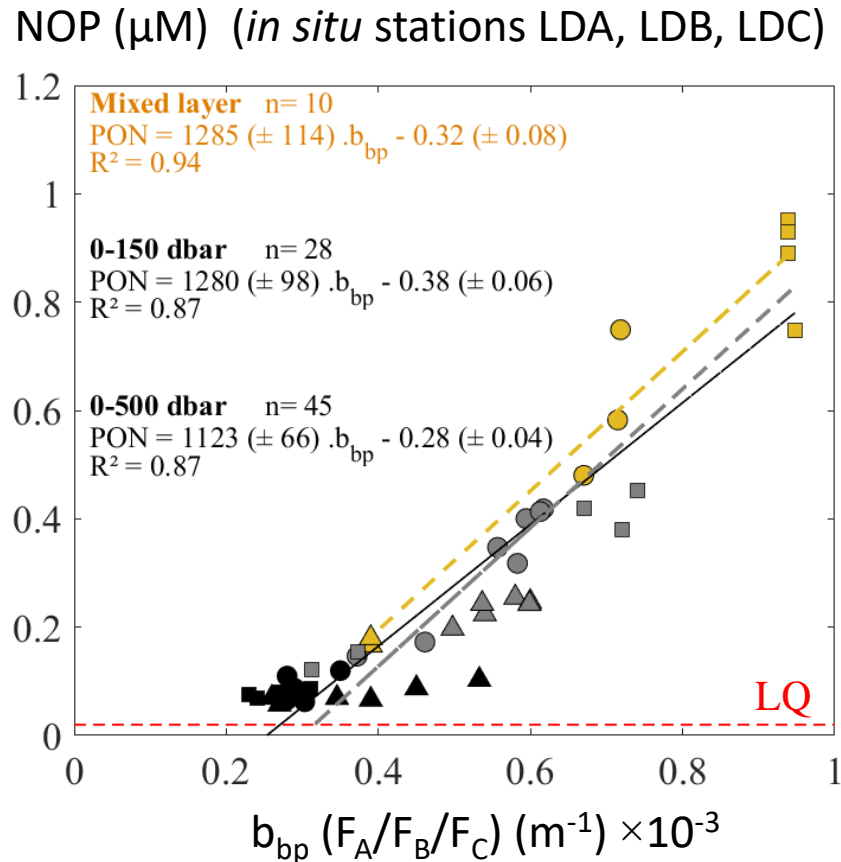
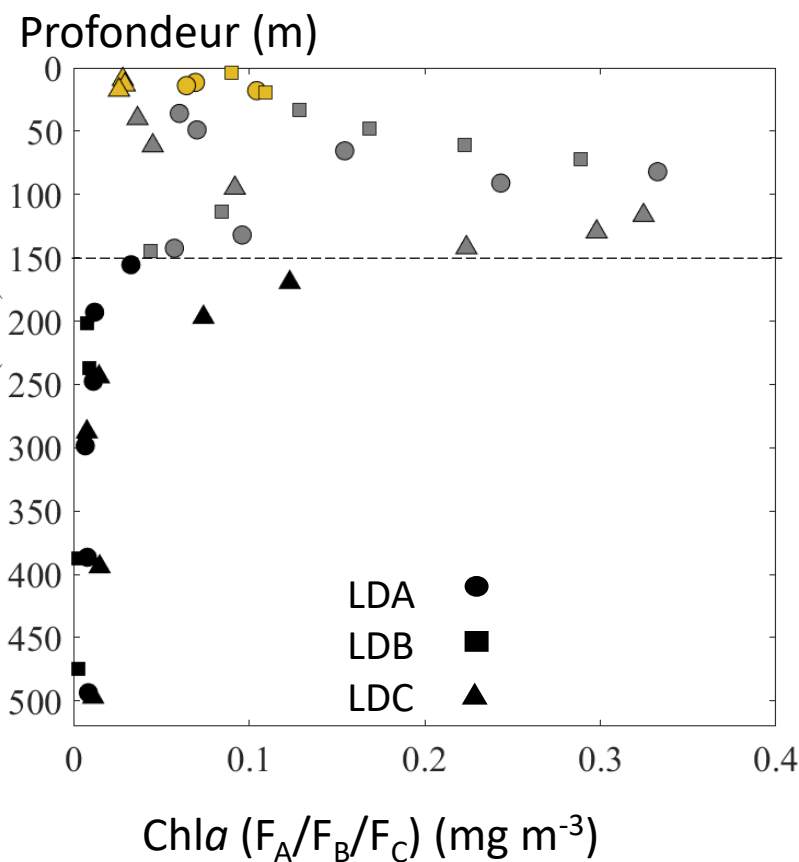
2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

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



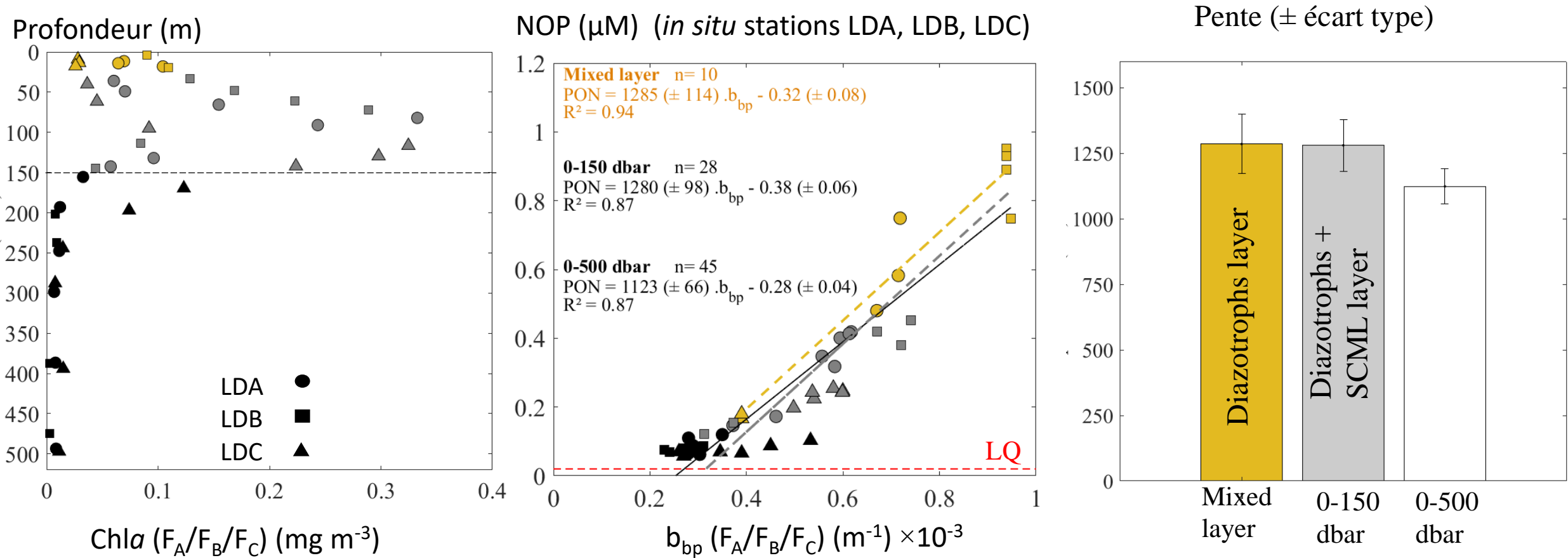
2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

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



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

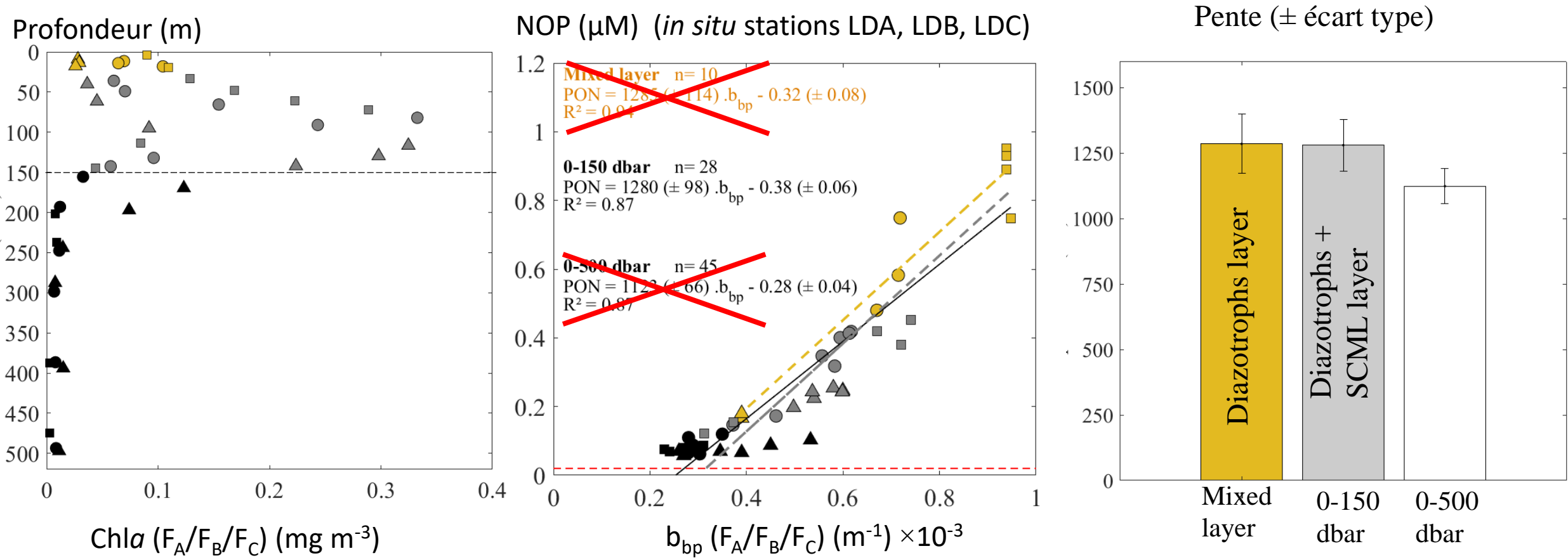
2^{em} tentative pour obtenir un proxy optique de la MOP



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

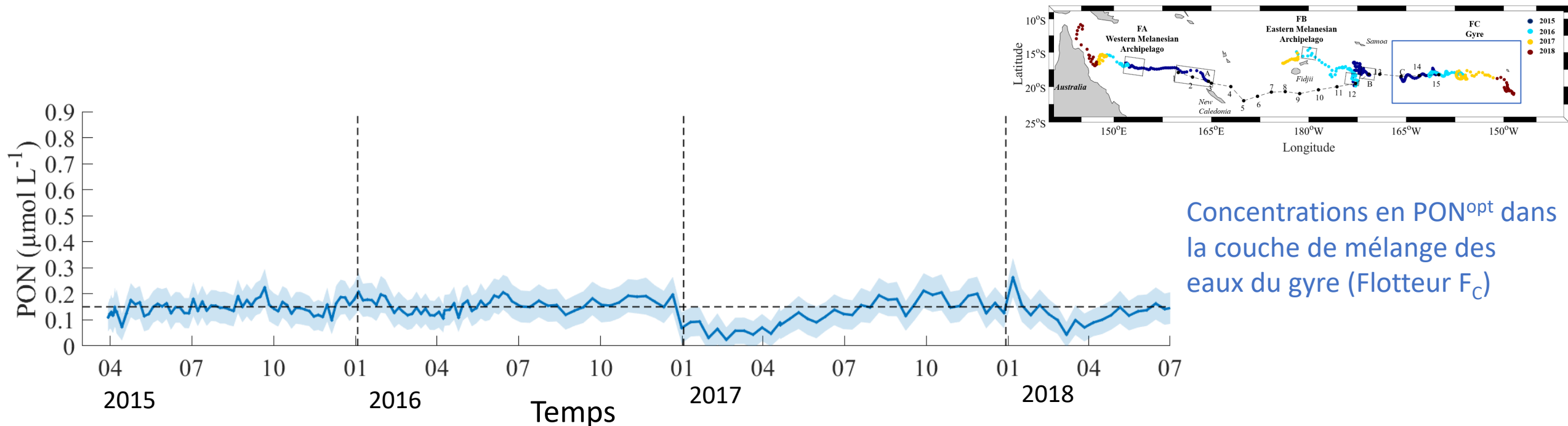
2-2 Proxy optique de la MOP adapté à la région oligotrophe du WTSP

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: $\text{PON}^{\text{opt}} = 1280 \times b_{bp} - 0,38$

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

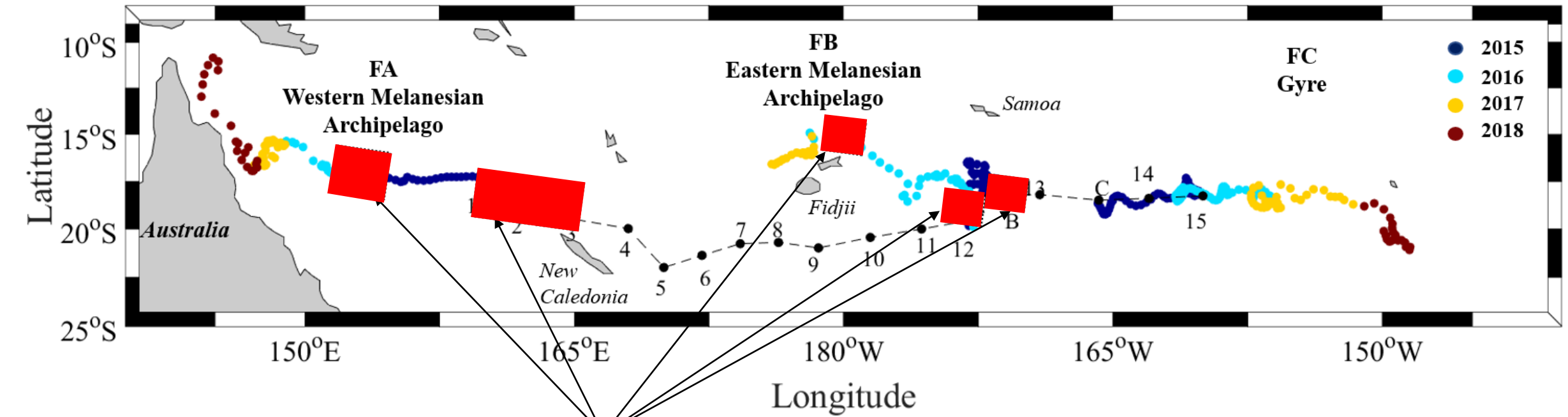


PON^{opt} remarquablement stable et faible ($< 0,20 \mu\text{M}$)

- Équilibre entre production et reminéralisation/export
- Production phytoplanctonique (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*)

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

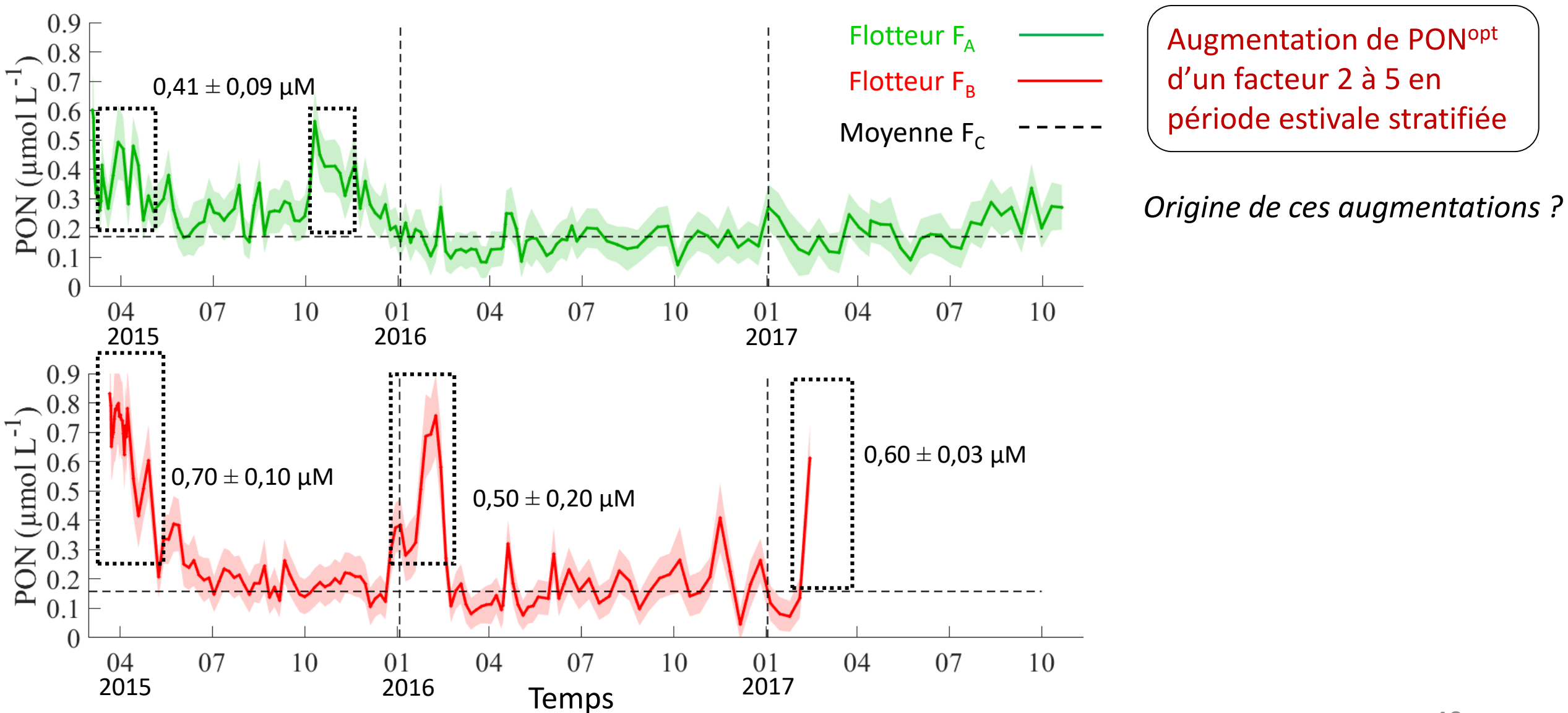
Variations temporelles de la biomasse organique particulaire dans l'archipel Mélanésien



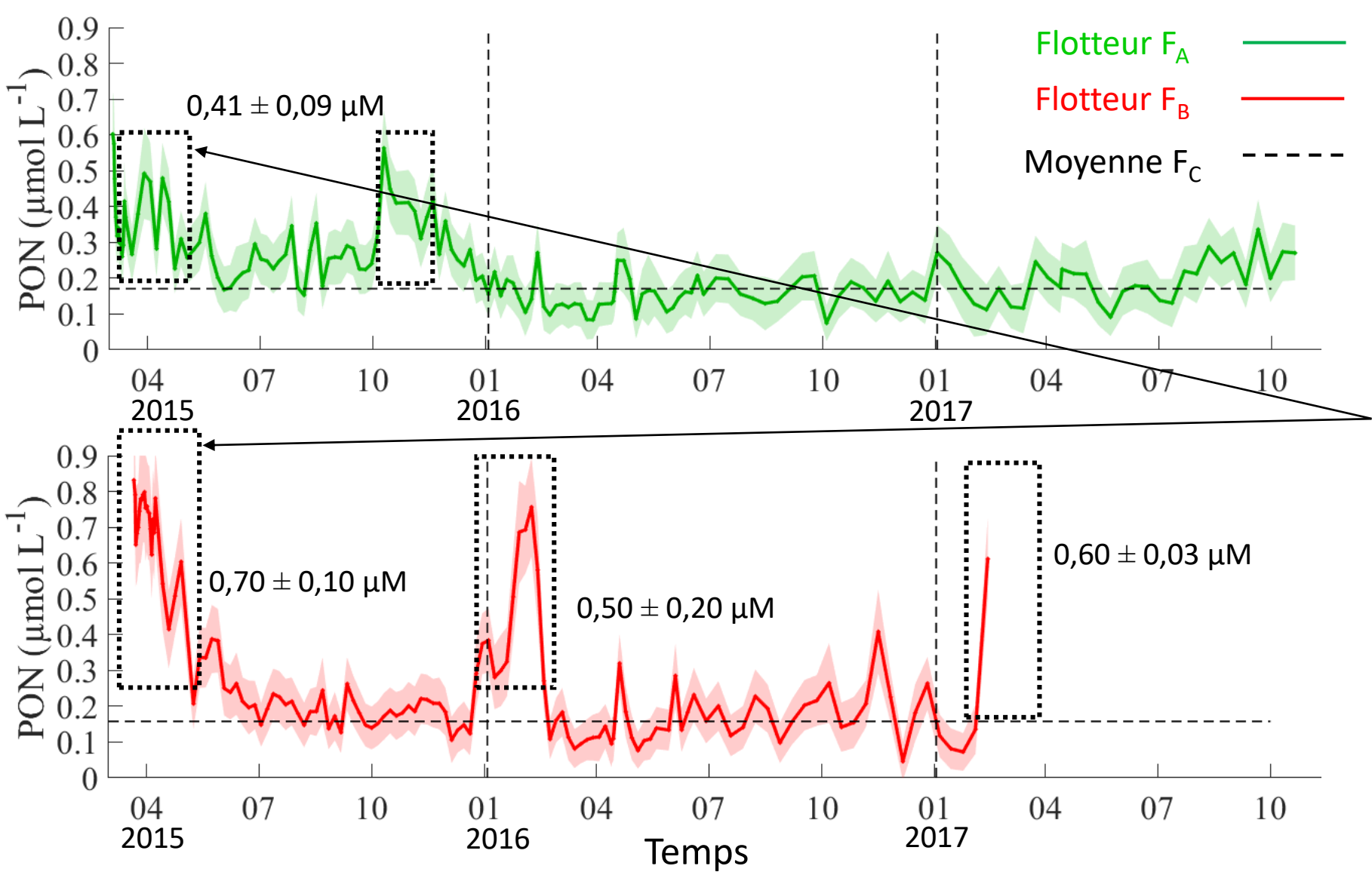
Augmentation de PON^{opt} dans l'Archipel Mélanésien

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

Variations temporelles de la biomasse organique particulaire 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

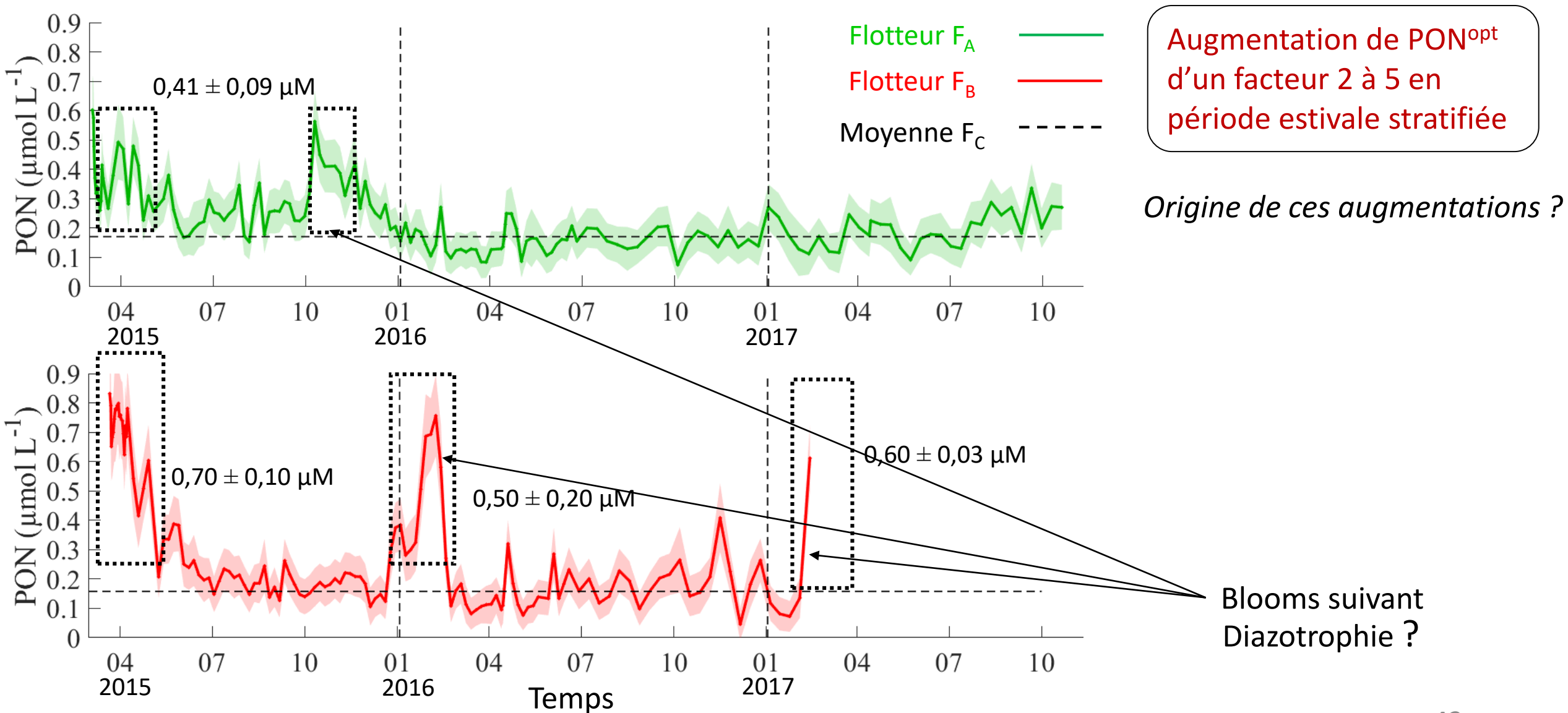
Origine de ces augmentations ?

Deux premiers blooms

➤ Blooms de diazotrophes
observés pendant la campagne

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

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



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

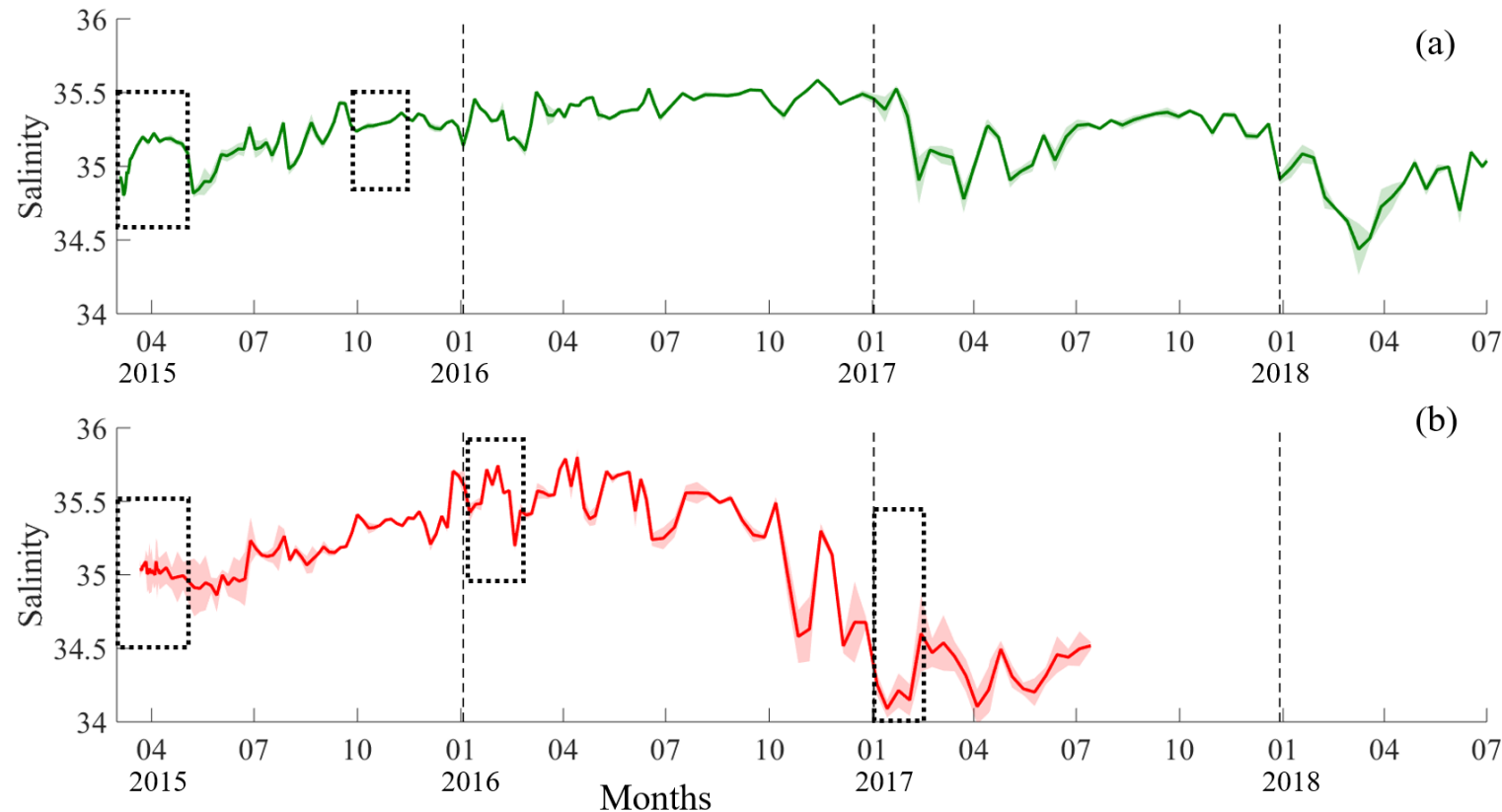
D'où provient le N qui supporte la production de PON^{opt} ?

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*)



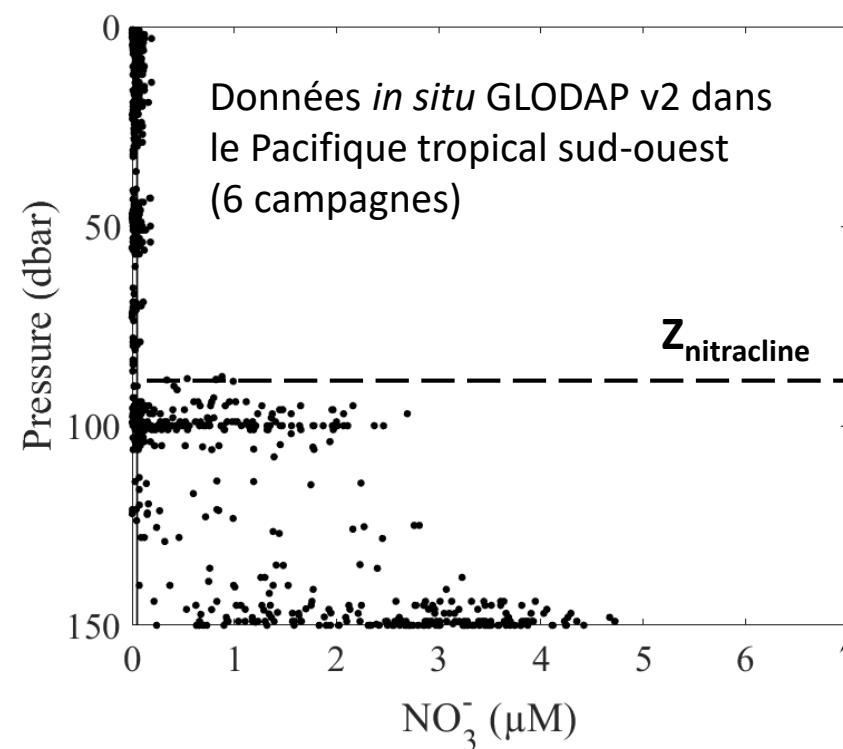
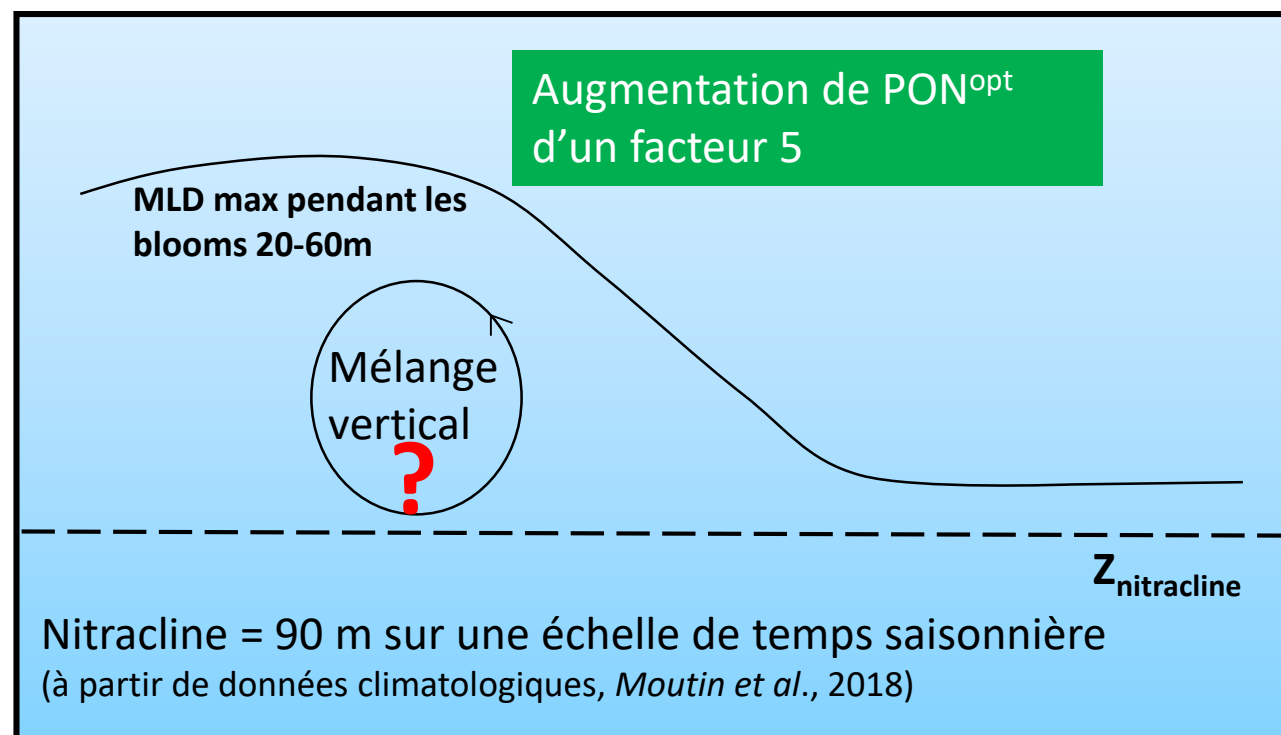
Salinité moyenne dans la ML

➤ 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 nitracine ?**
- **Processus méso-échelle/ Ondes internes : déplacement de la nitracine ?** (*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 nitracine

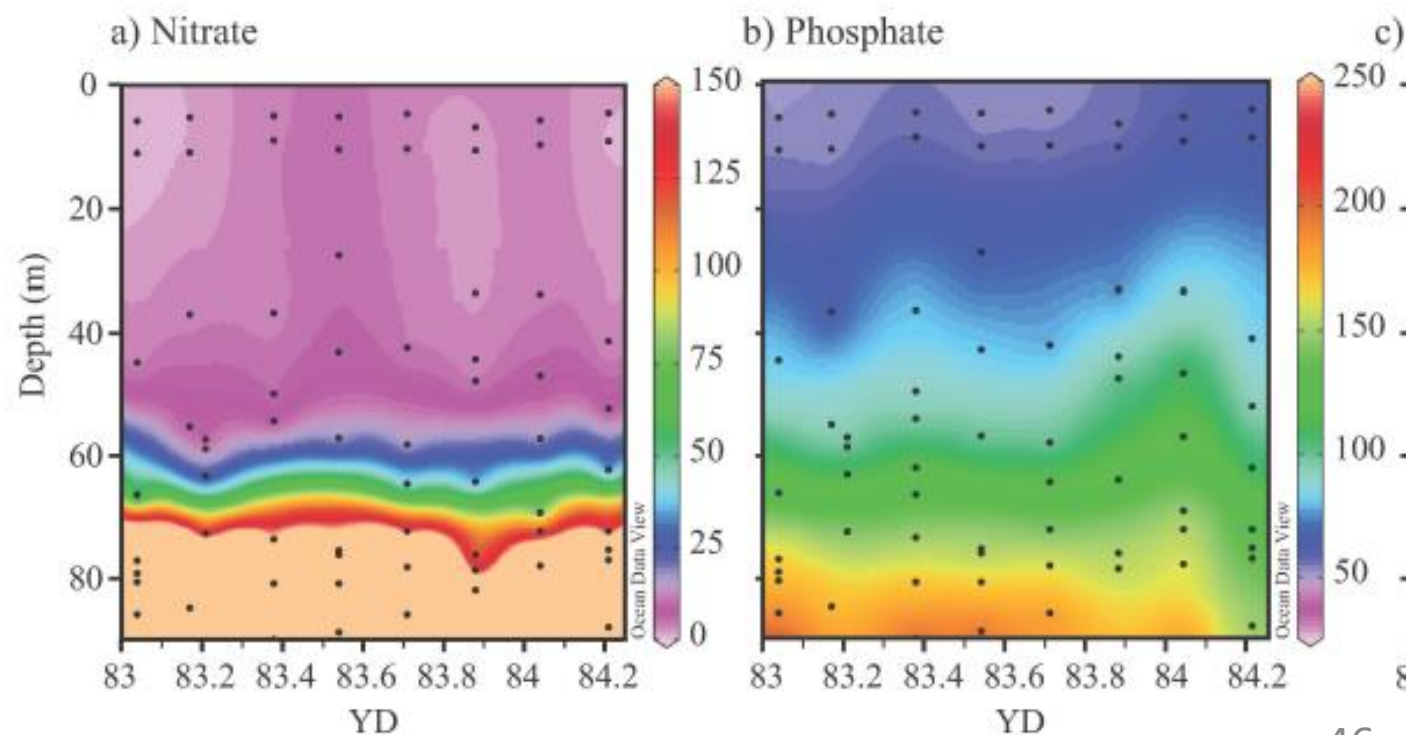
Phosphacline moins profonde que la nitracine

- 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 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} ?

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



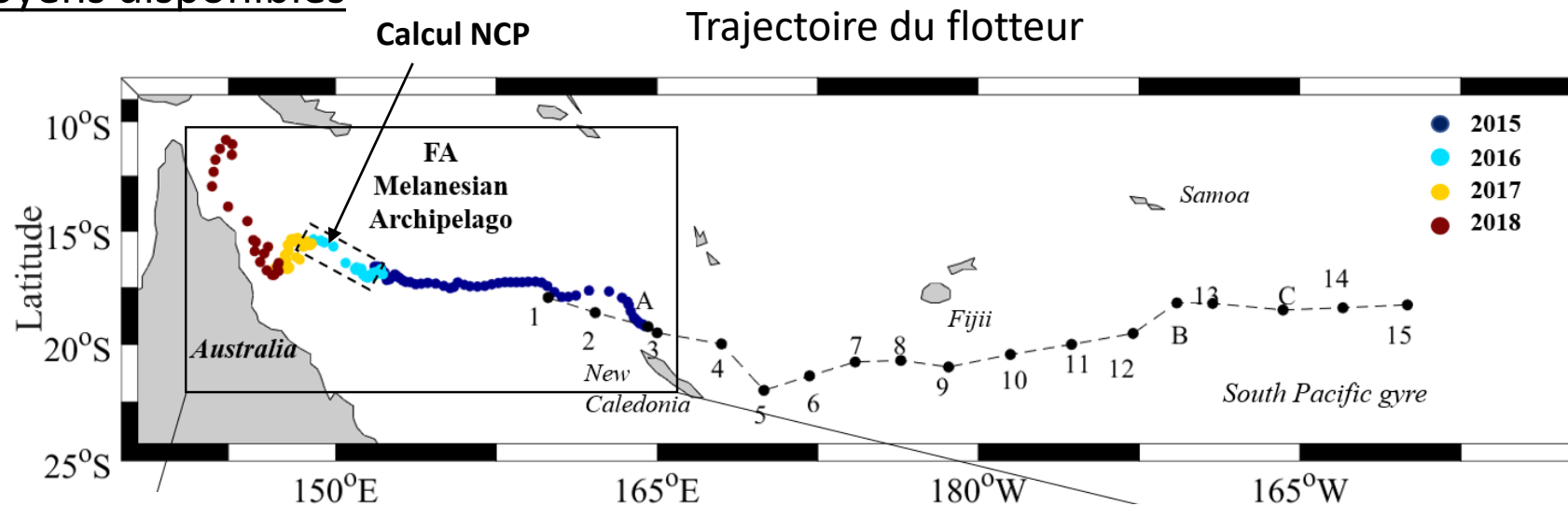
Article refusé par le 2nd éditeur



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

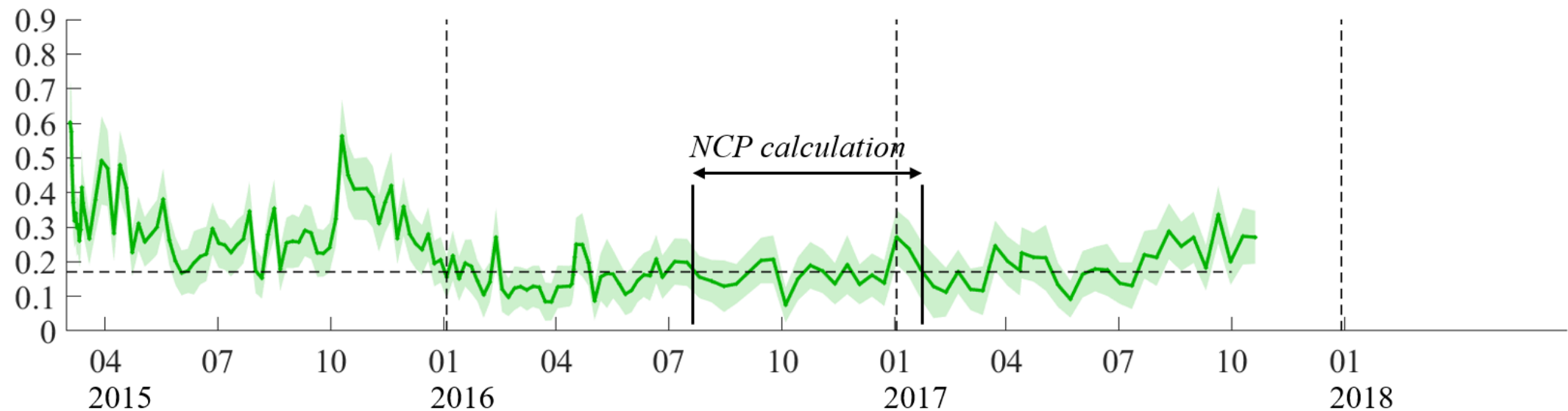
2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chl a de subsurface

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 μ M)

[PON opt] (μ M)
(F $_A$)

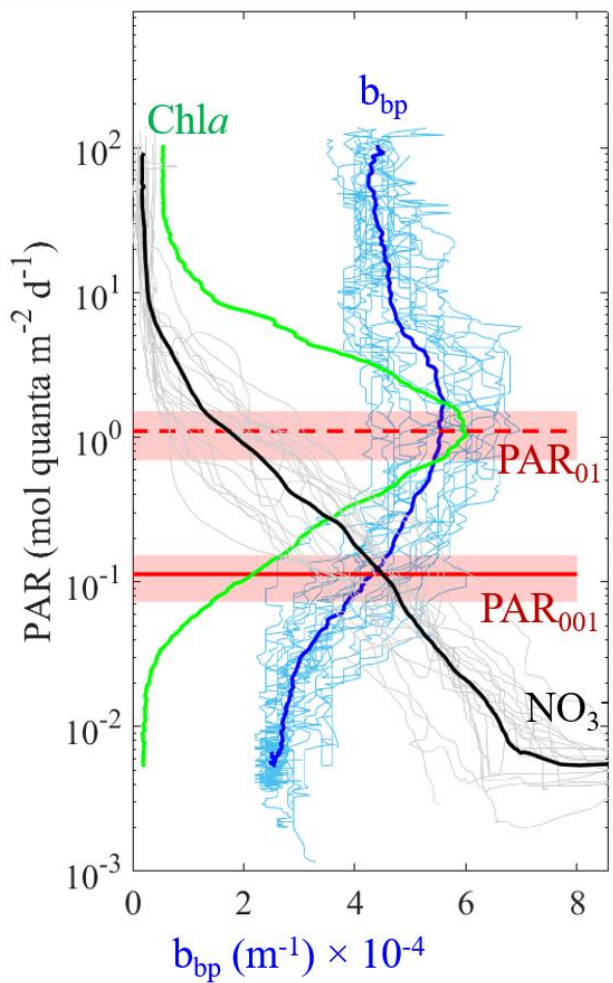
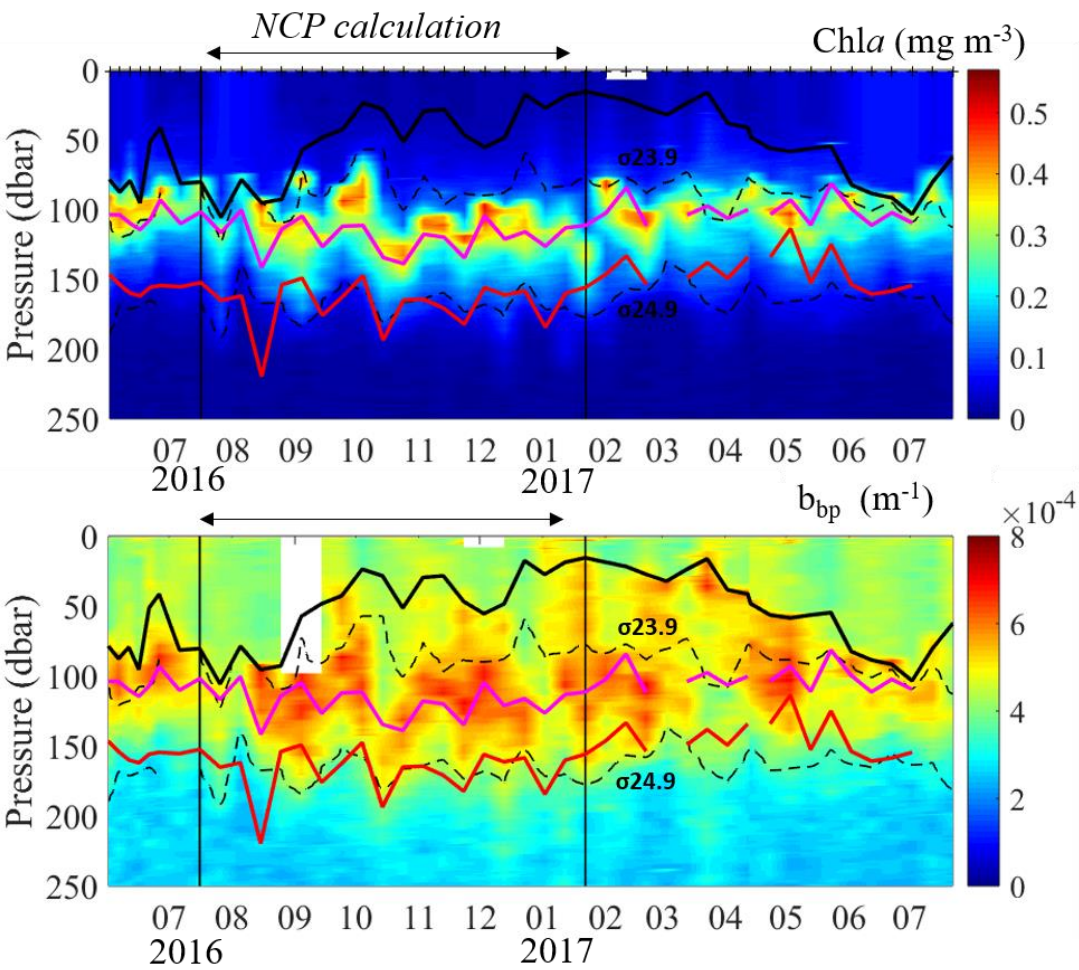
Du 26 juillet 2016 au 22 janvier 2017 (180 jours = 6 mois)



- 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

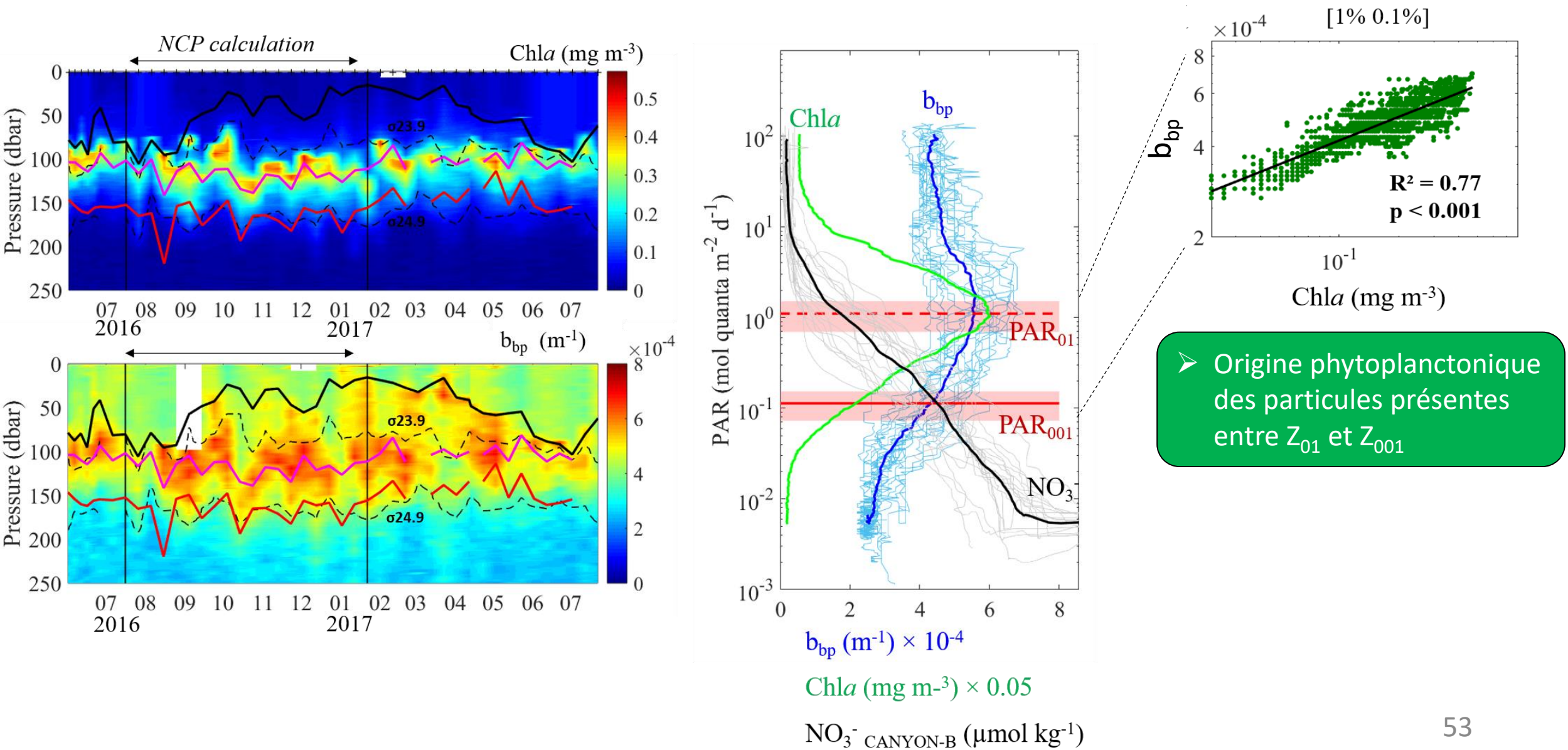


- Max de Chl*a* centré sur Z_{01}
- S'étend jusqu'à Z_{001} (0,1%)
- Max de Chl*a* = Max de b_{bp}
- Positionné entre $\sigma_{23,9}$ et $\sigma_{24,9}$
- $[\text{NO}_3^-]$ suffisante pour soutenir une production nouvelle de MOP

$b_{bp} (\text{m}^{-1}) \times 10^{-4}$
 $\text{Chl}a (\text{mg m}^{-3}) \times 0.05$
 $\text{NO}_3^- \text{ CANYON-B } (\mu\text{mol kg}^{-1})$

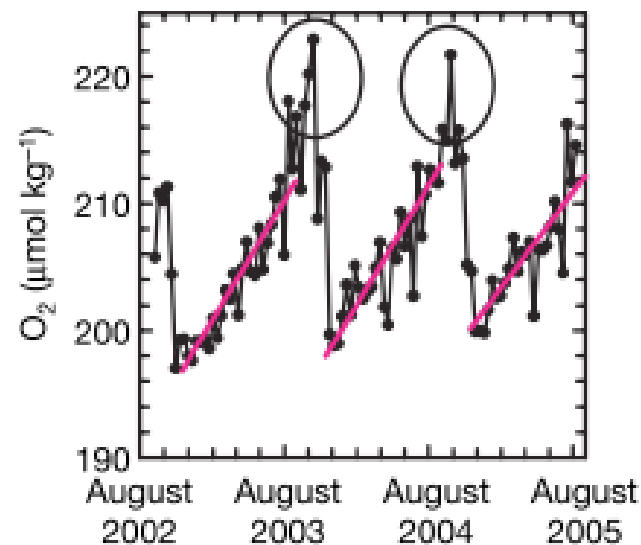
2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

Définition de la couche associée au maximum de Chla de subsurface



2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chl*a* 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 $\text{mmol C m}^{-3} \text{ a}^{-1}$

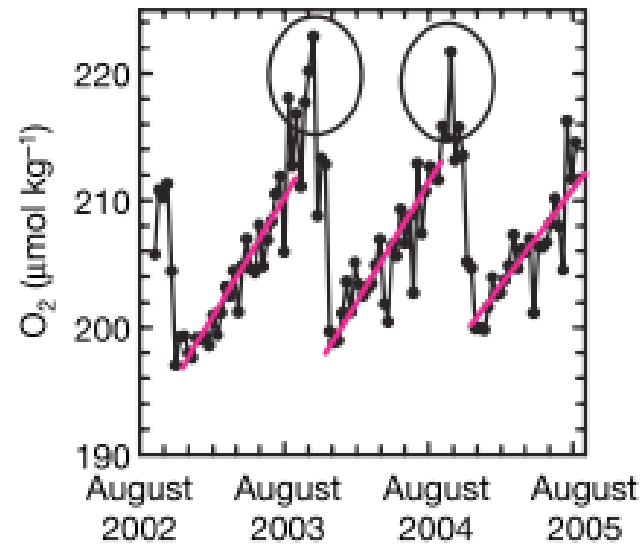
Redfield ratio

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

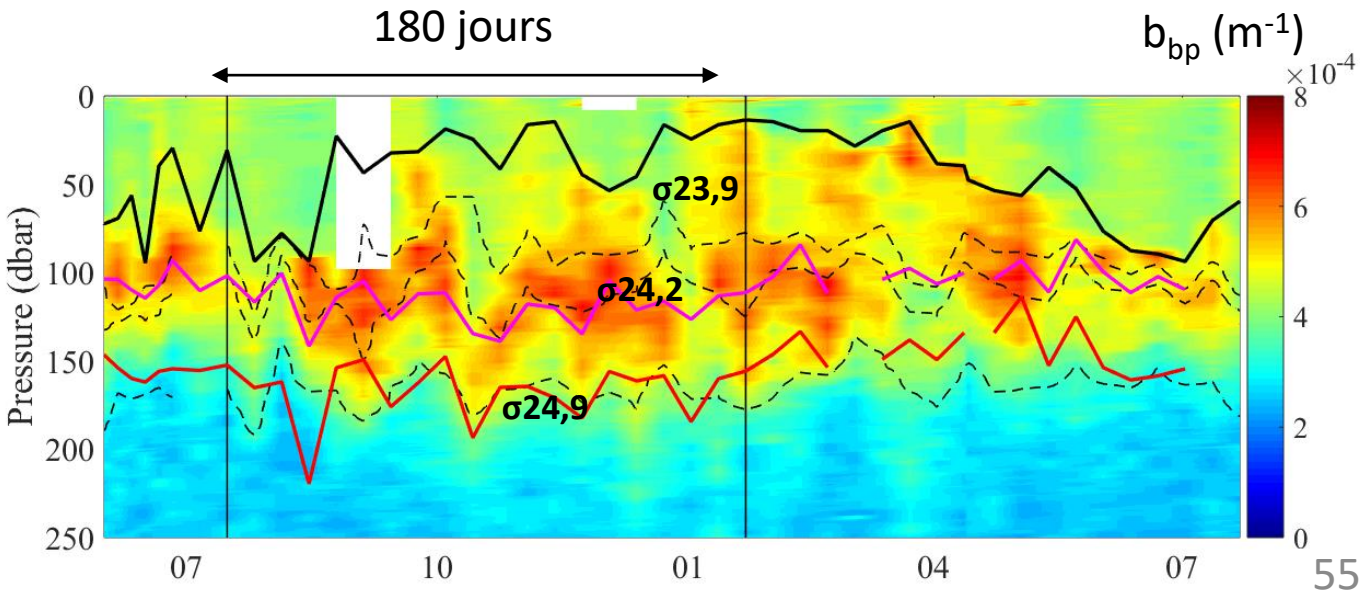
Redfield ratio

➤ 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)

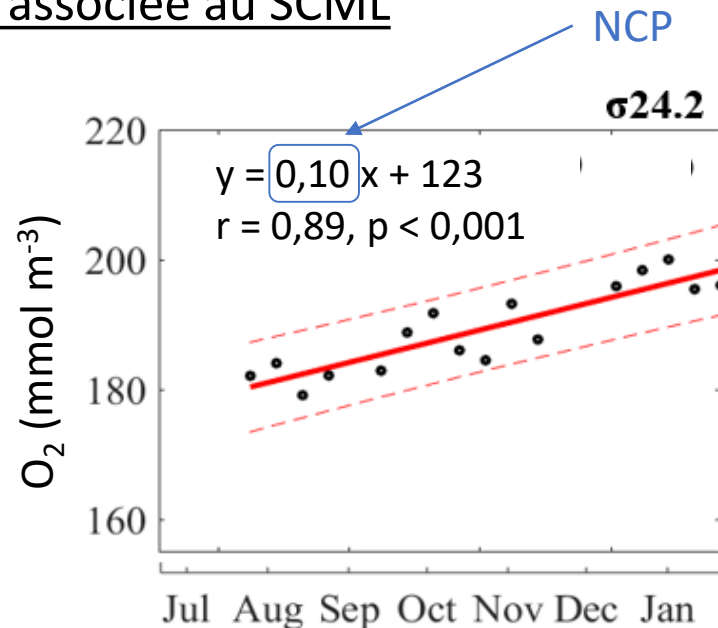
Dans notre étude

- Méthode appliquée seulement au SCML
- Jusqu'à la profondeur Z_{001} et non Z_{01}
- Sur des surfaces isopycnales ($\sigma_{23,9}$ - $\sigma_{24,9}$) et non à des profondeurs fixes



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

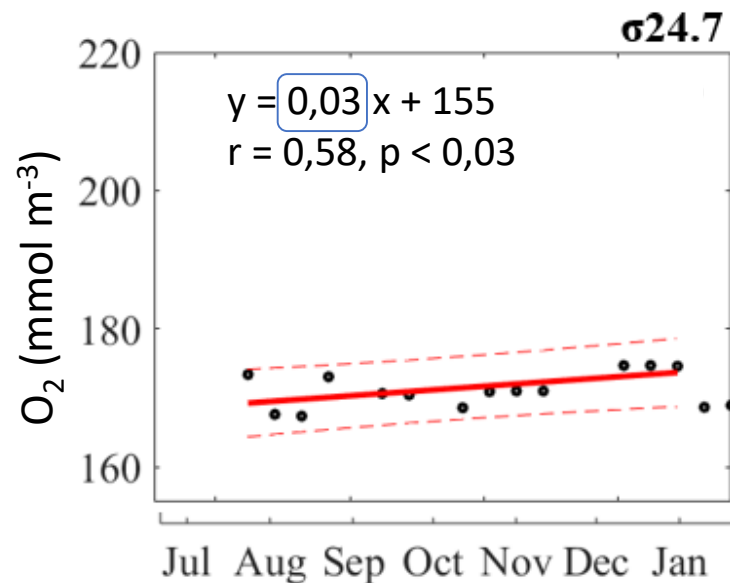
NCP associée au SCML



Exemple

[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

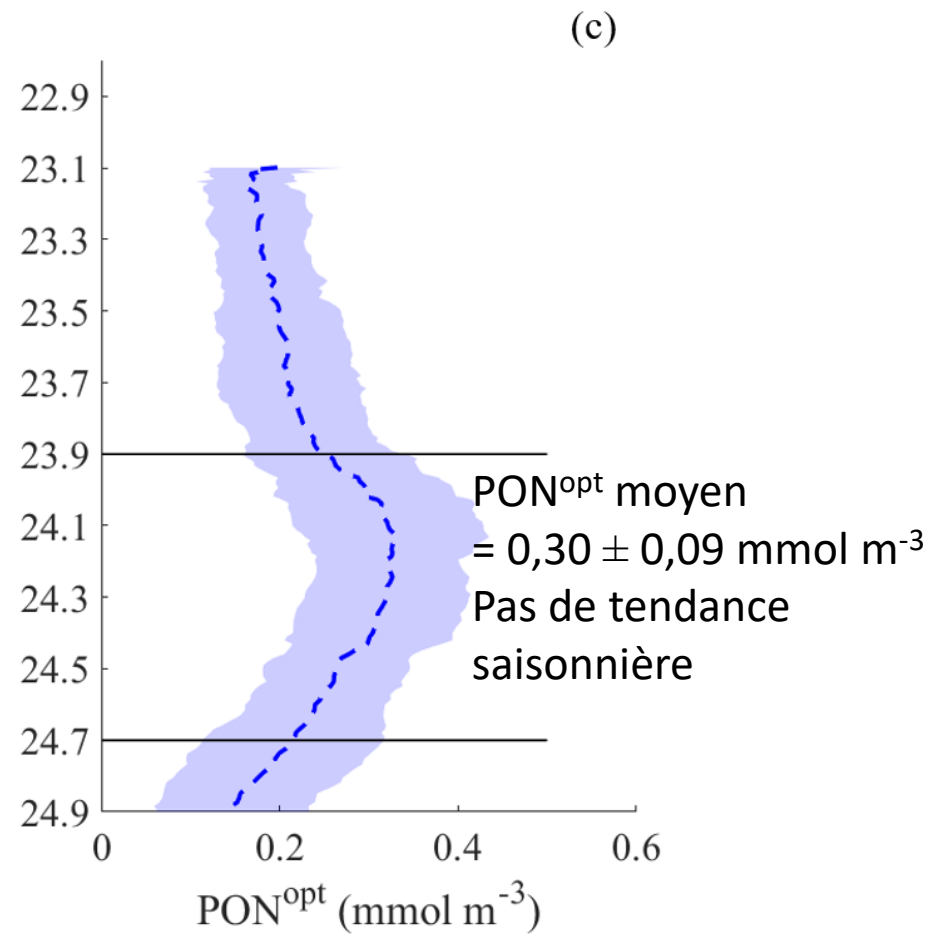
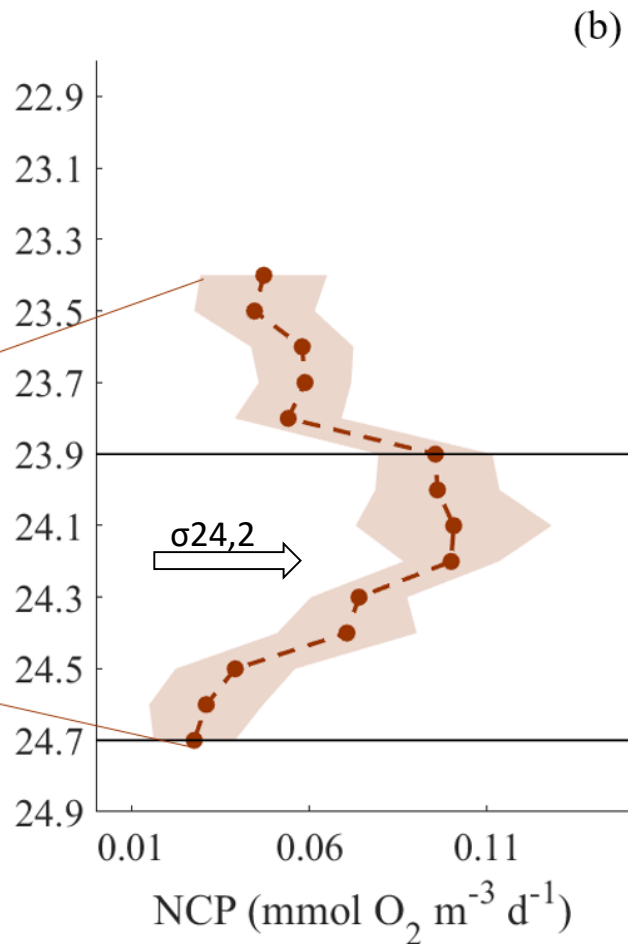
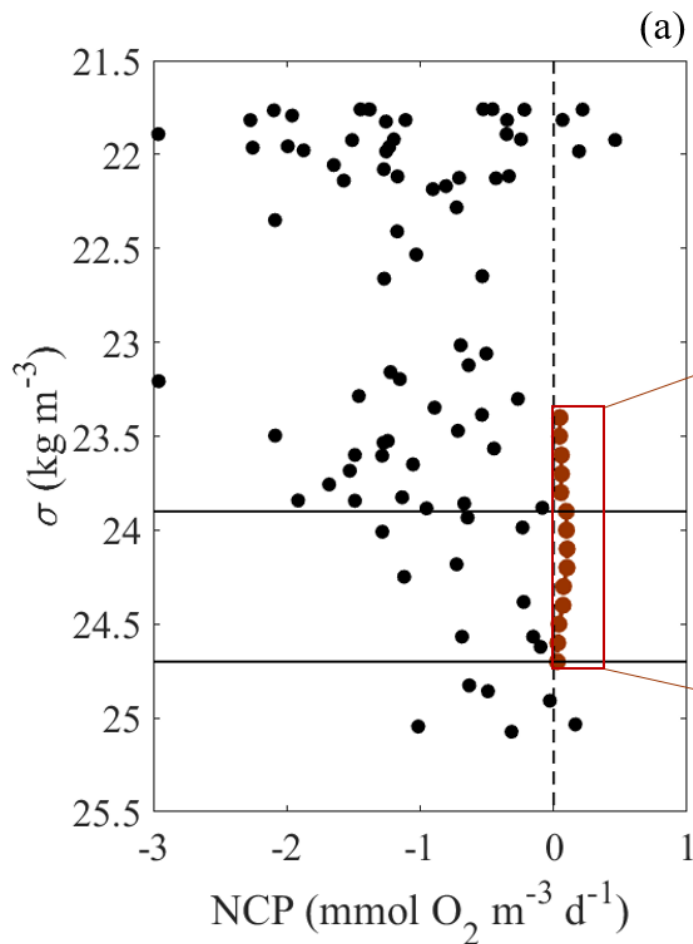
En dessous de $\sigma_{24,7}$, relation non significative

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

NCP associée au SCML

Mesures *in vitro* (OUTPACE) (●)

Mesures flotteur (●)

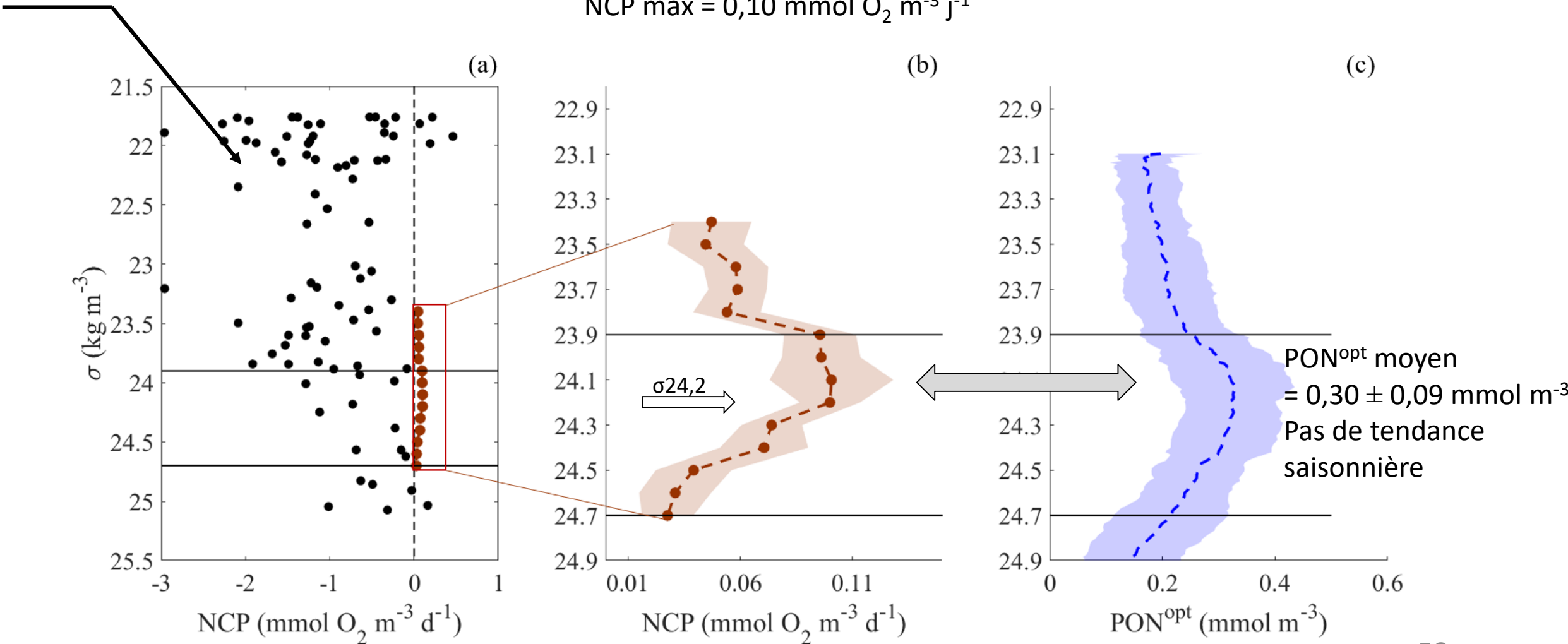


2-3 Production communautaire nette (NCP) associée au maximum de Chla de subsurface

NCP associée au SCML

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

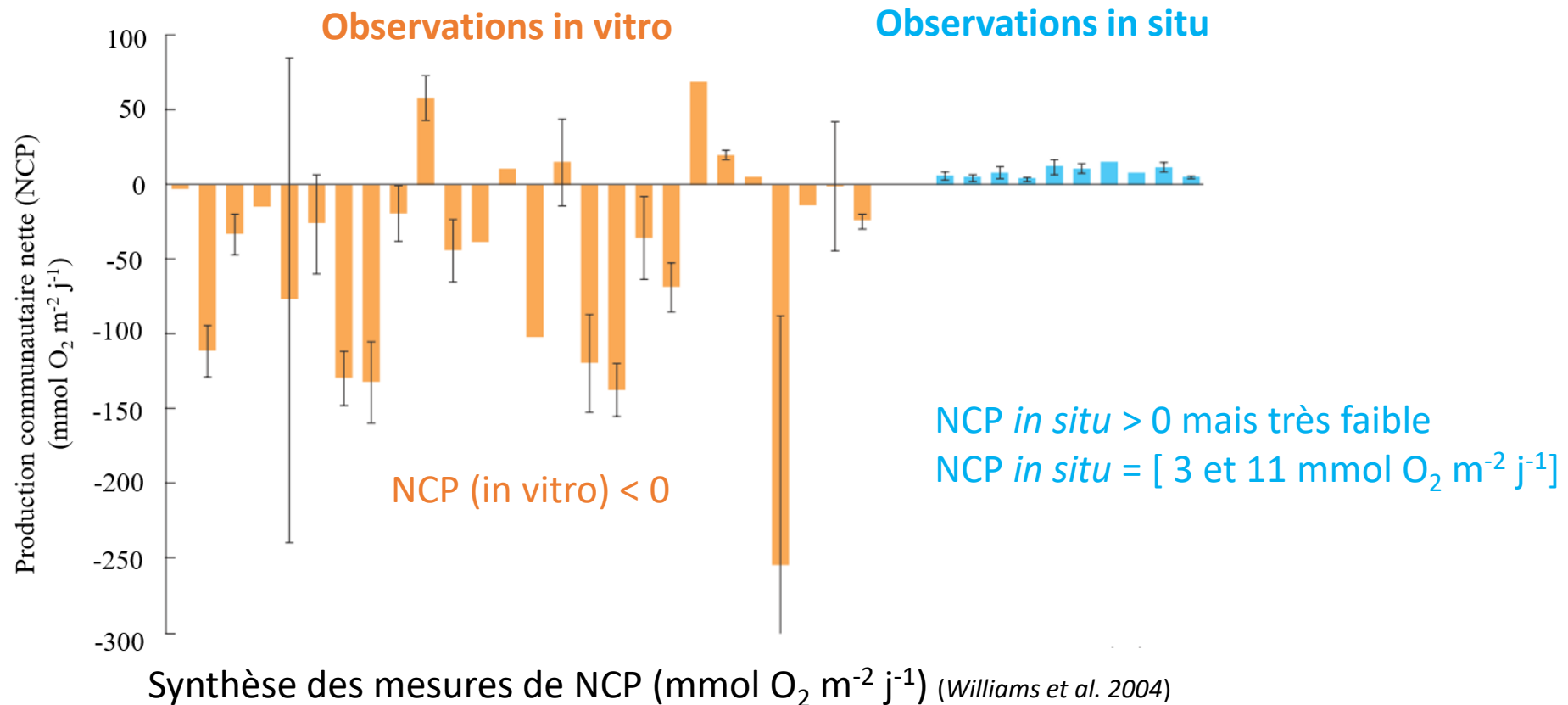
Mesures flotteur (●)
NCP > 0 associée à un maximum de PON^{opt}
NCP max = 0,10 mmol O₂ m⁻³ j⁻¹



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

$= 0,07 \pm 0,03 \text{ mmol m}^{-3} \text{ j}^{-1}$ sur une couche d'eau d'environ 63 m

$$= 2,5 - 3,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ j}^{-1}$$

- Estimation de NCP faible mais positive cohérente avec la littérature

En résumé

Dans le WTSP

- **Maximum permanent de Chl α** de subsurface = photo acclimatation + **maximum de MOP**
- **Pas de variations saisonnières** de la [MOP] (PON^{opt} moyen = $0,30 \pm 0,09 \text{ mmol m}^{-3}$)
- **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 Mélénesien → 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 Mélénesien → 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

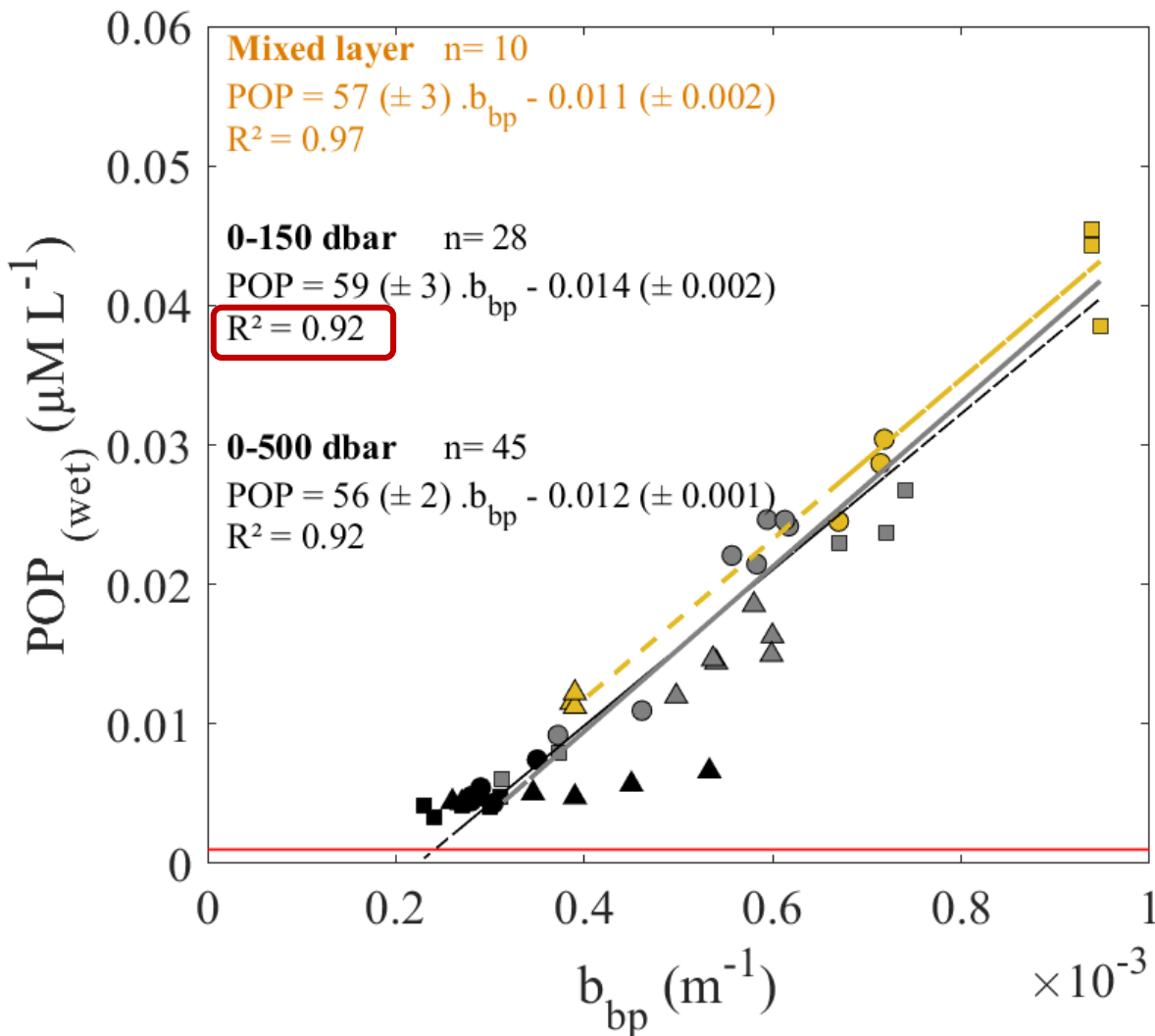
- Devenir de la MOP dans le Pacifique tropical sud-ouest?

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}

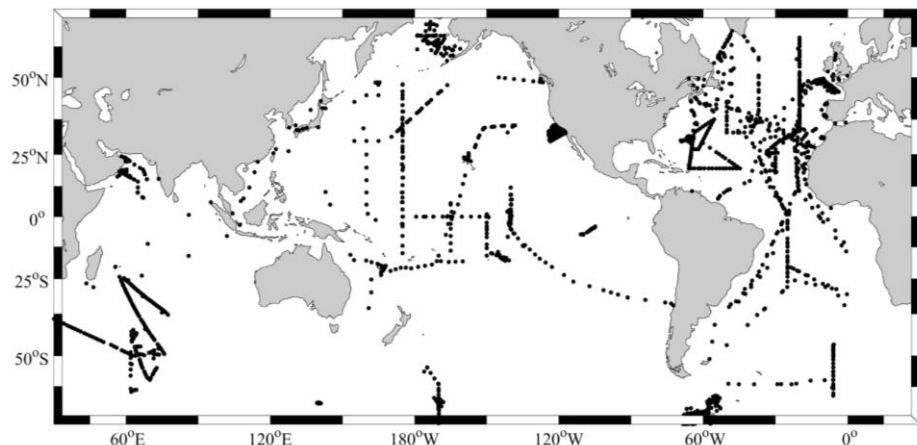
- Stock de POP moins variable d'un point de vue optique que le stock de NOP

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 de Verneil
(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)

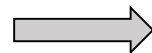
Diapositives supplémentaires

Travail réalisé pendant la thèse ?

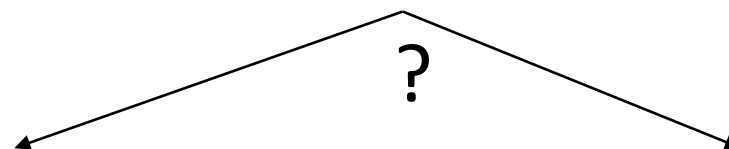
1^{er} partie de la thèse (1 année et demi)

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'acidifier 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 coûteuse 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 2×6 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,

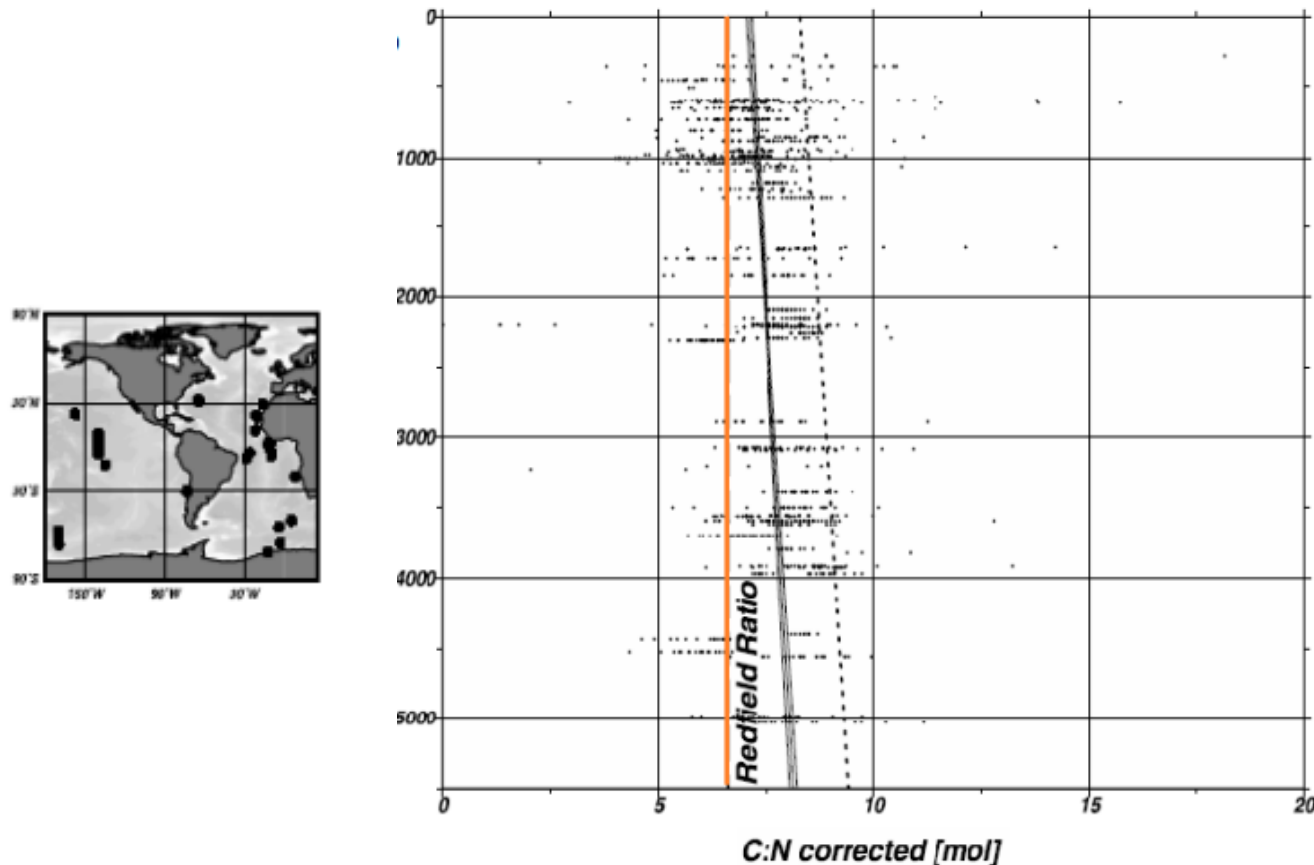
- LQ (PON) = $0.02 \mu\text{M}$
- LQ (POP) = $0.001 \mu\text{M}$

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**

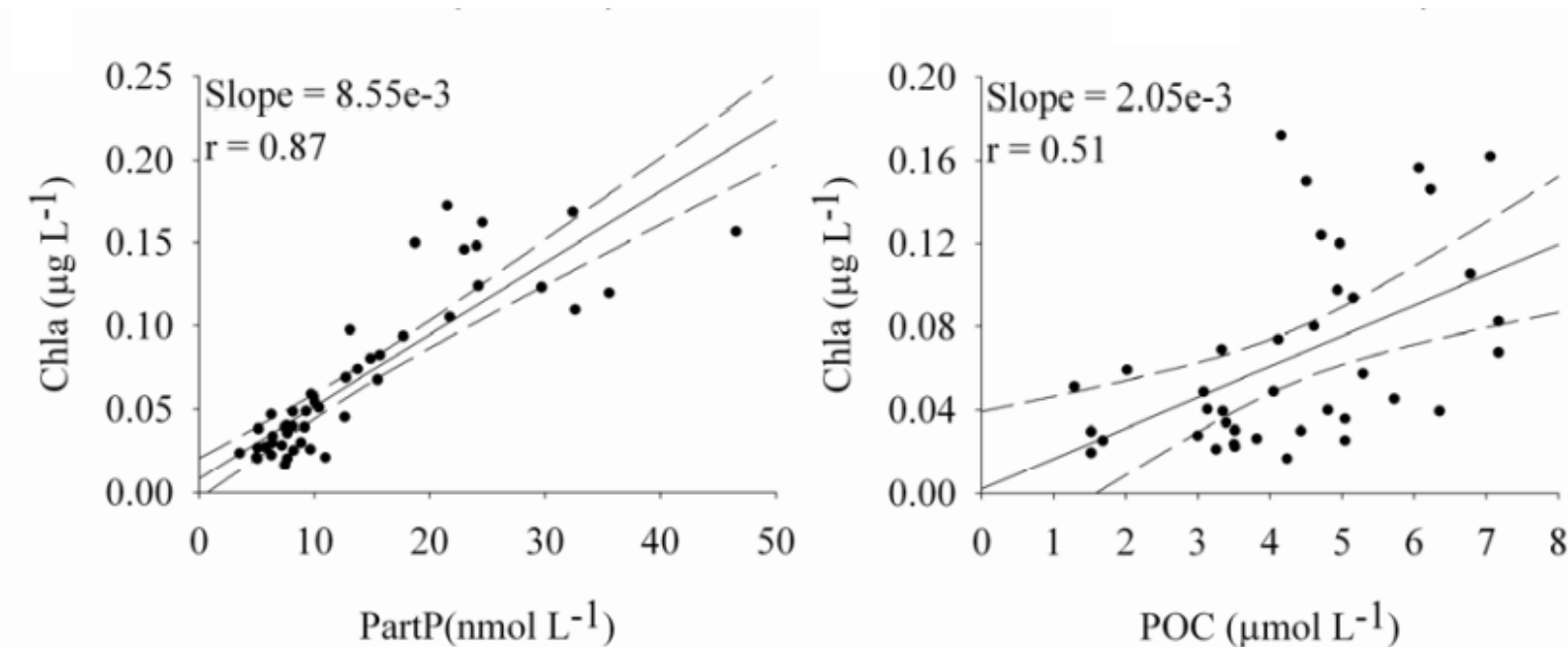
- Augmentation de 0,2 unités/1000m du rapport C:N avec la profondeur
- NOP reminéralisé plus rapidement que le COP

Reminéralisation préférentielle 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

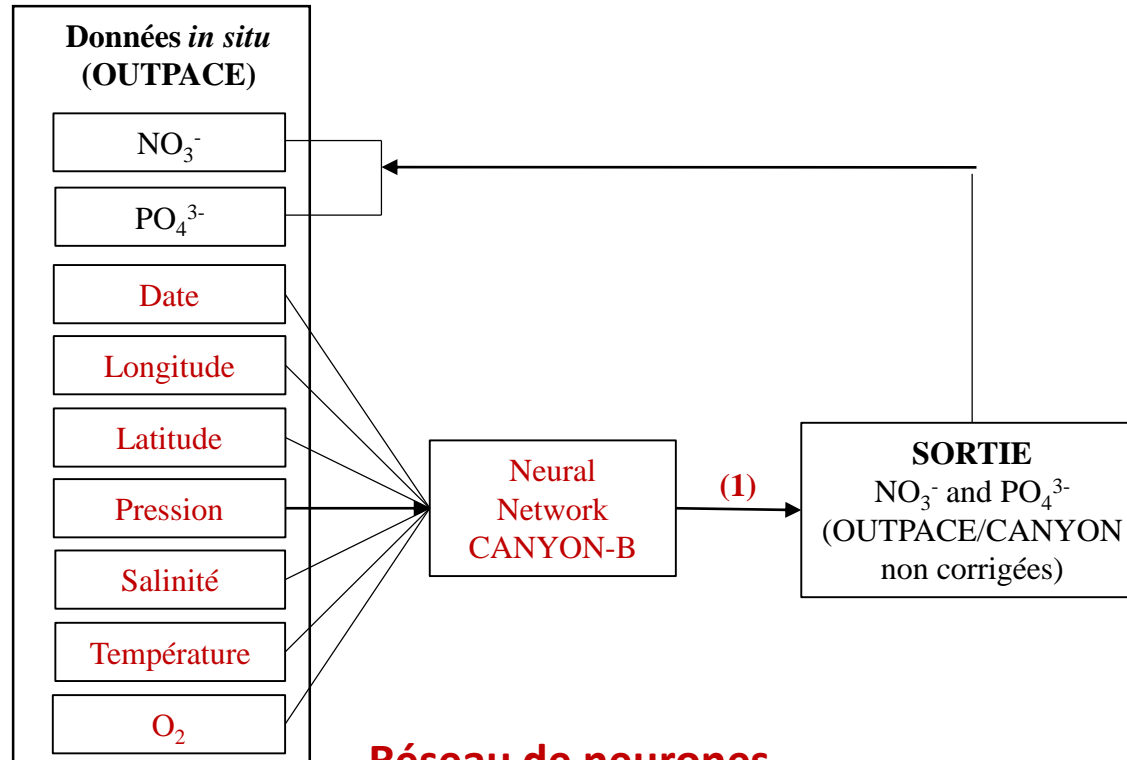


**Corrélation entre P particulaire et Chl a
meilleure qu'entre COP et Chl a**

→ P particulaire meilleur indicateur de la
biomasse vivante (*Duhamel et al., 2007*)

Campagne BIOSOPE dans le Pacifique tropical sud-est

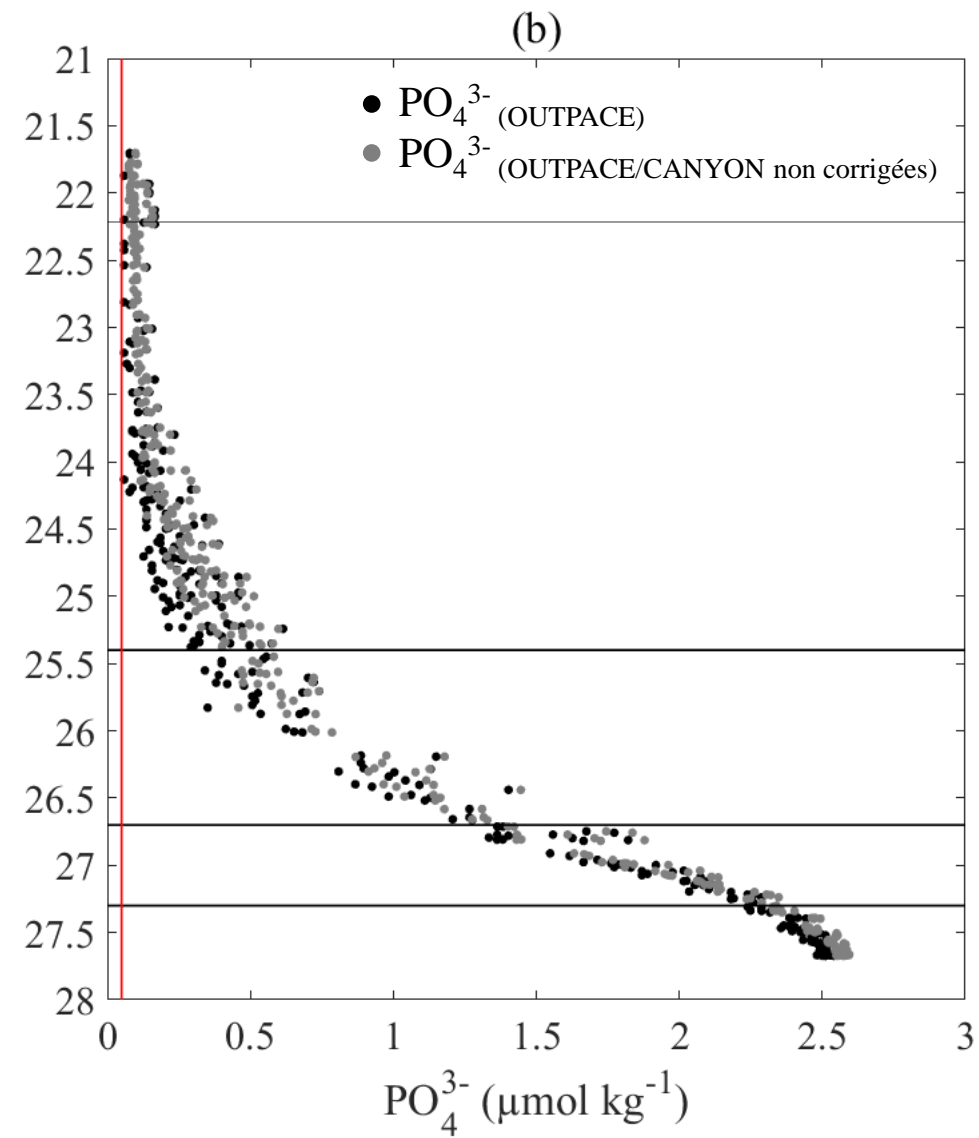
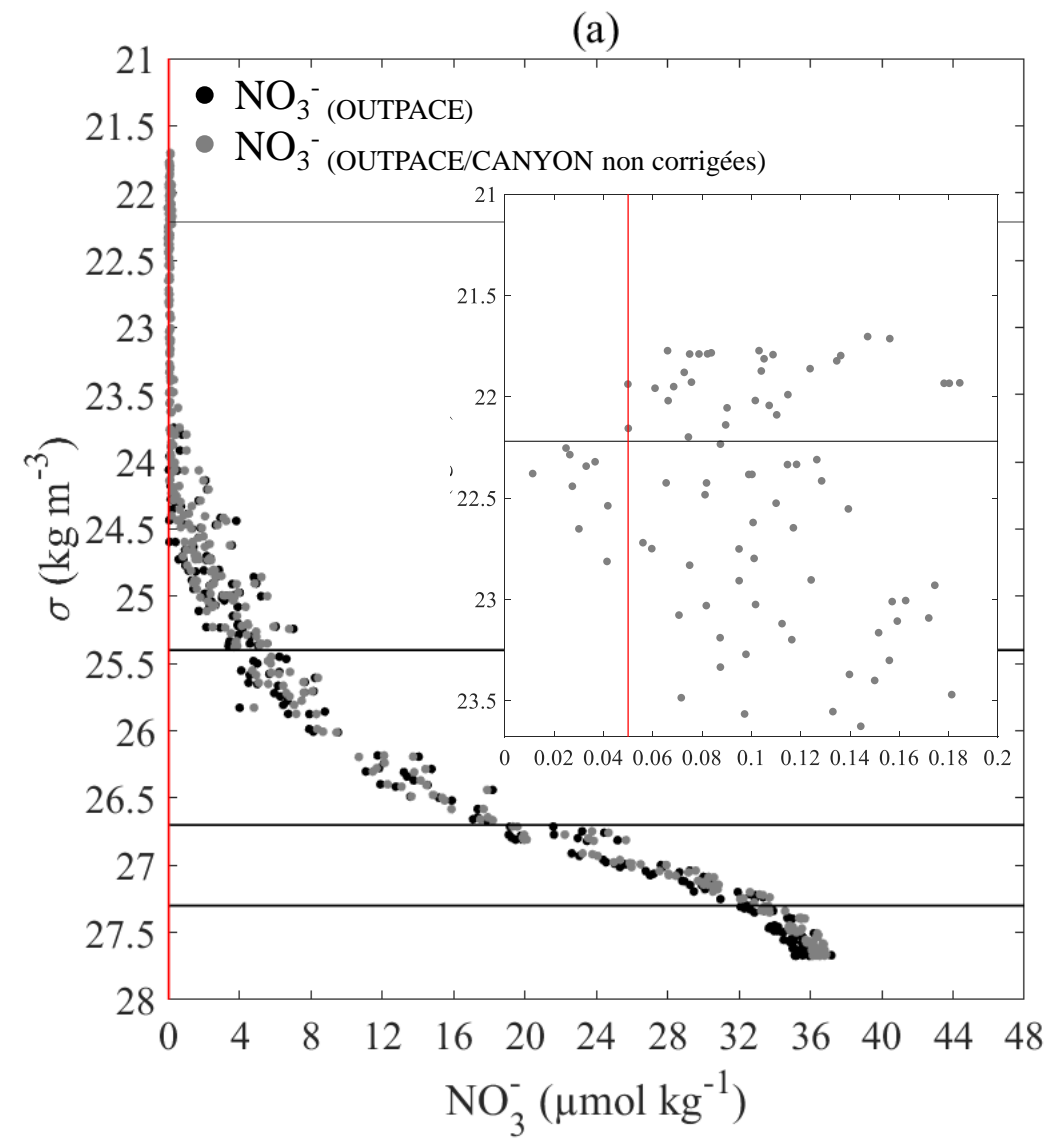
Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (*Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018*)



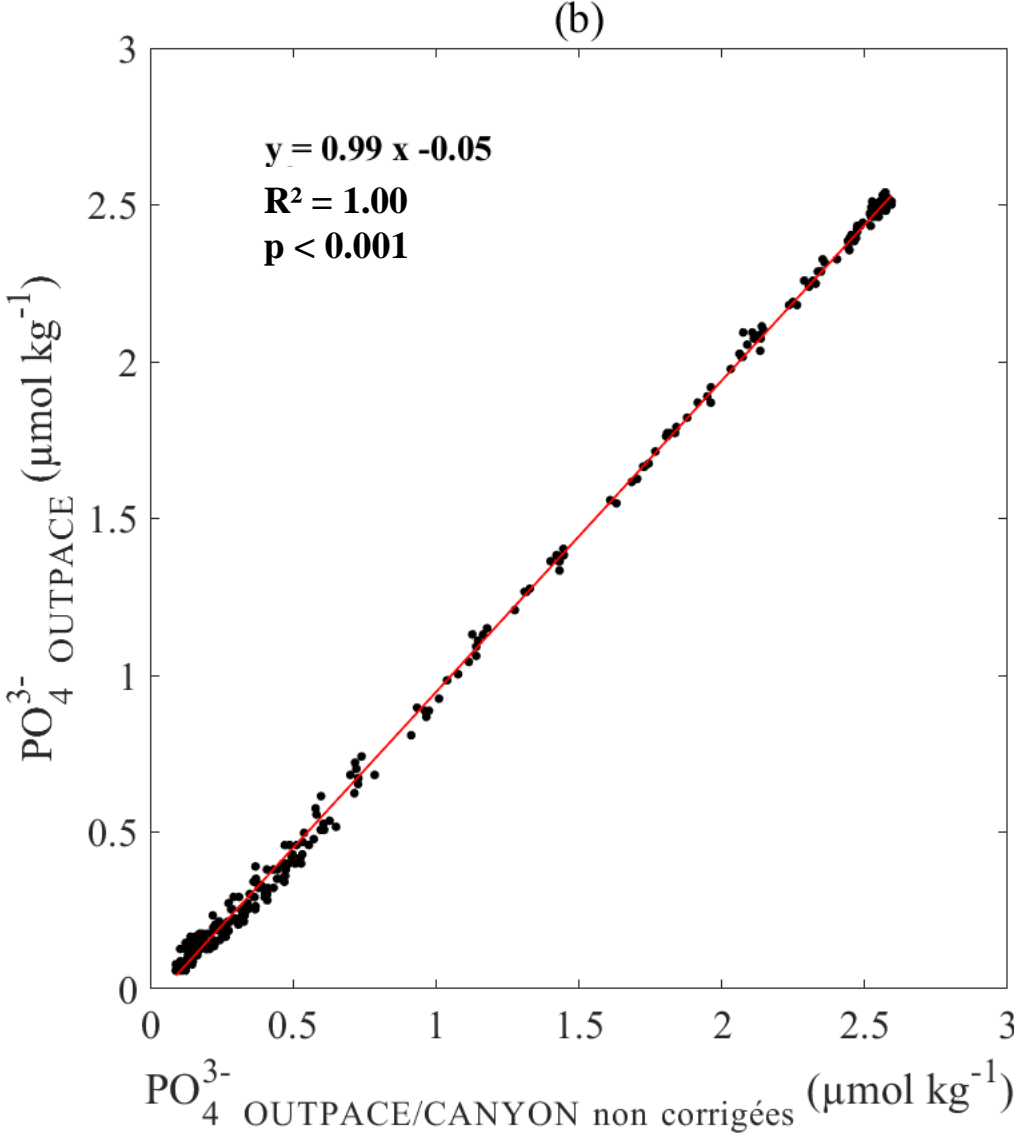
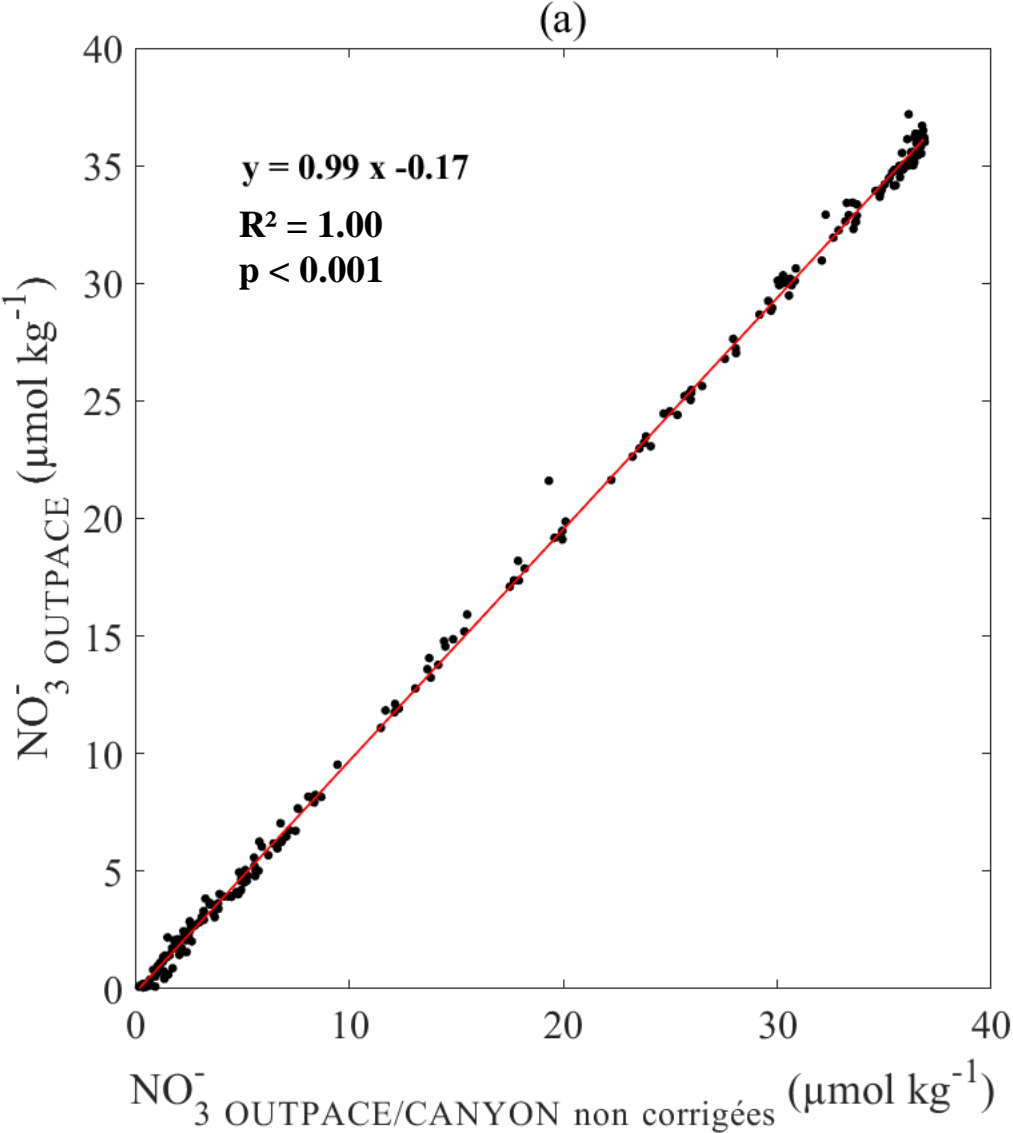
**Réseau de neurones
entraînés par le jeu de
donnée GLODAP_v2**

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

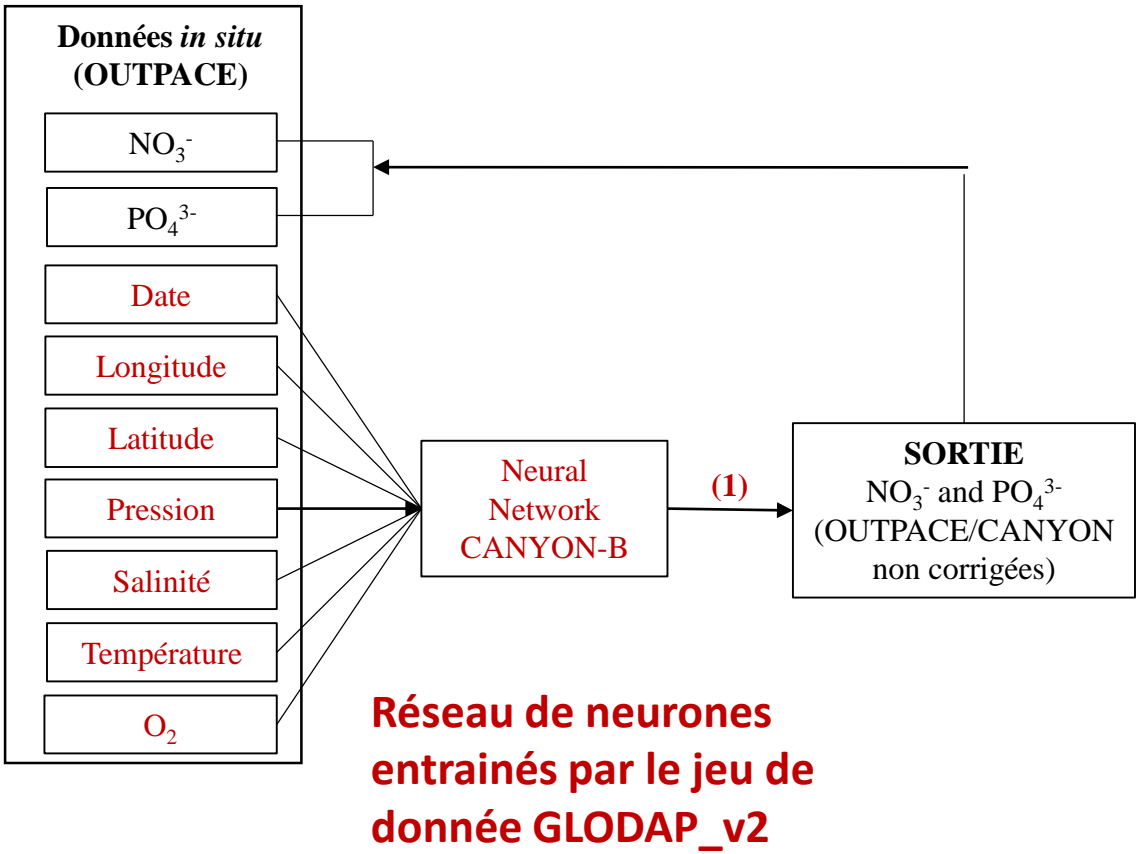
Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec CANYON-B (*Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018*)



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)

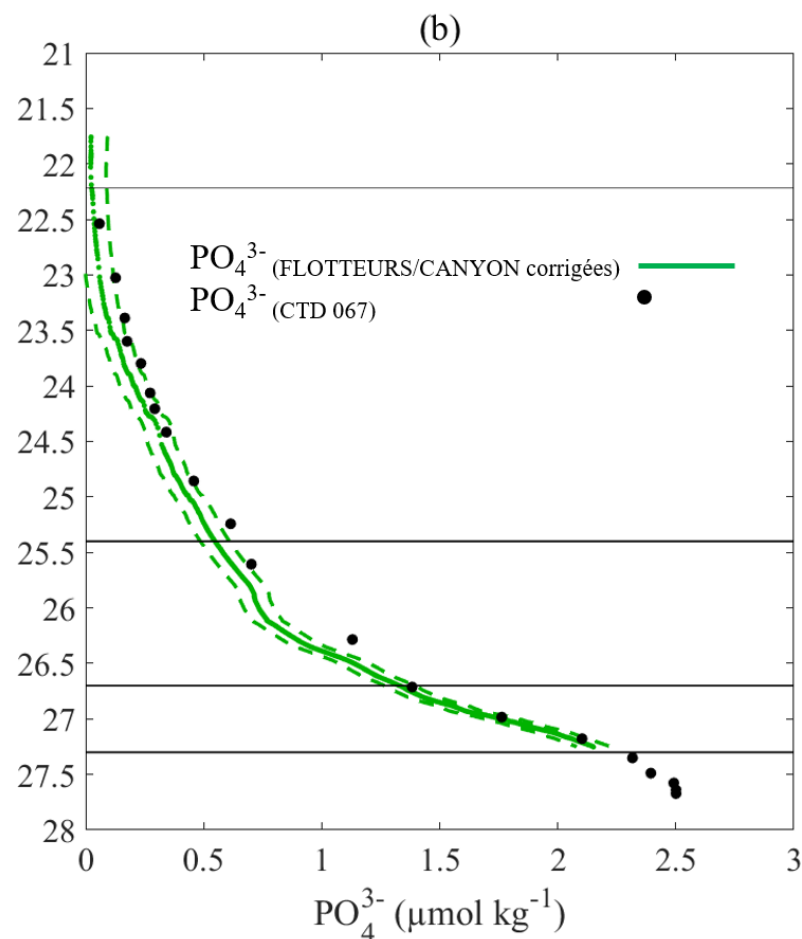
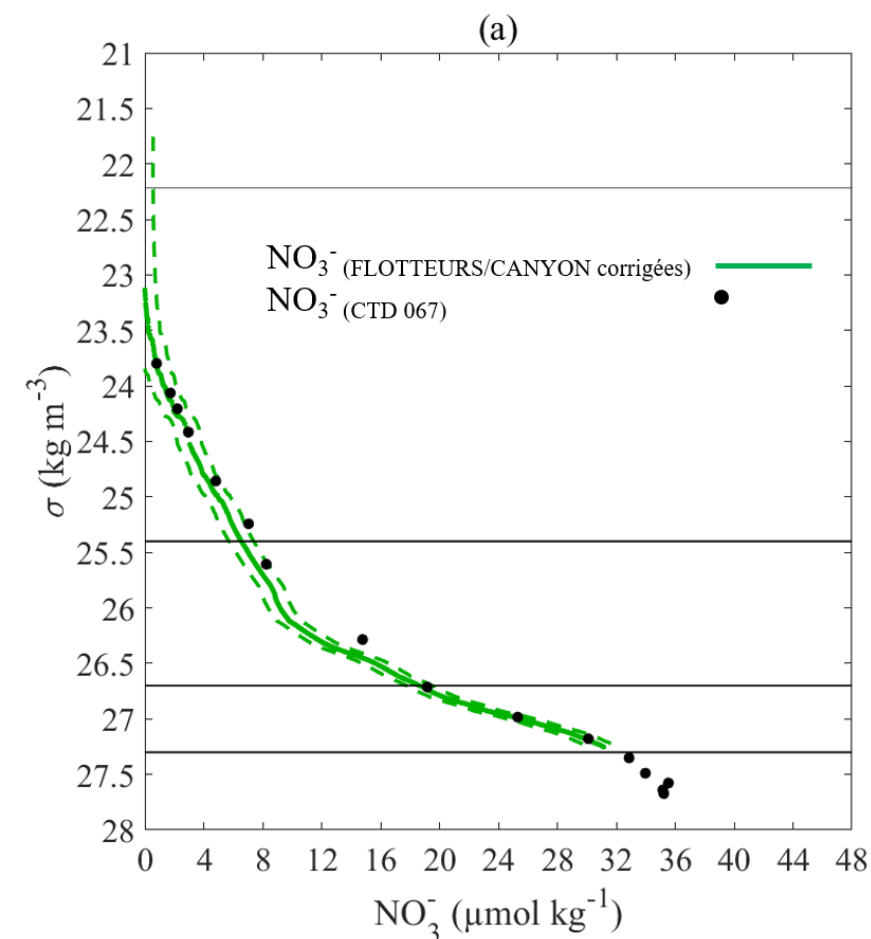


1^{er} étape : test réseau de neurones dans notre région ?
Valide dans notre région

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

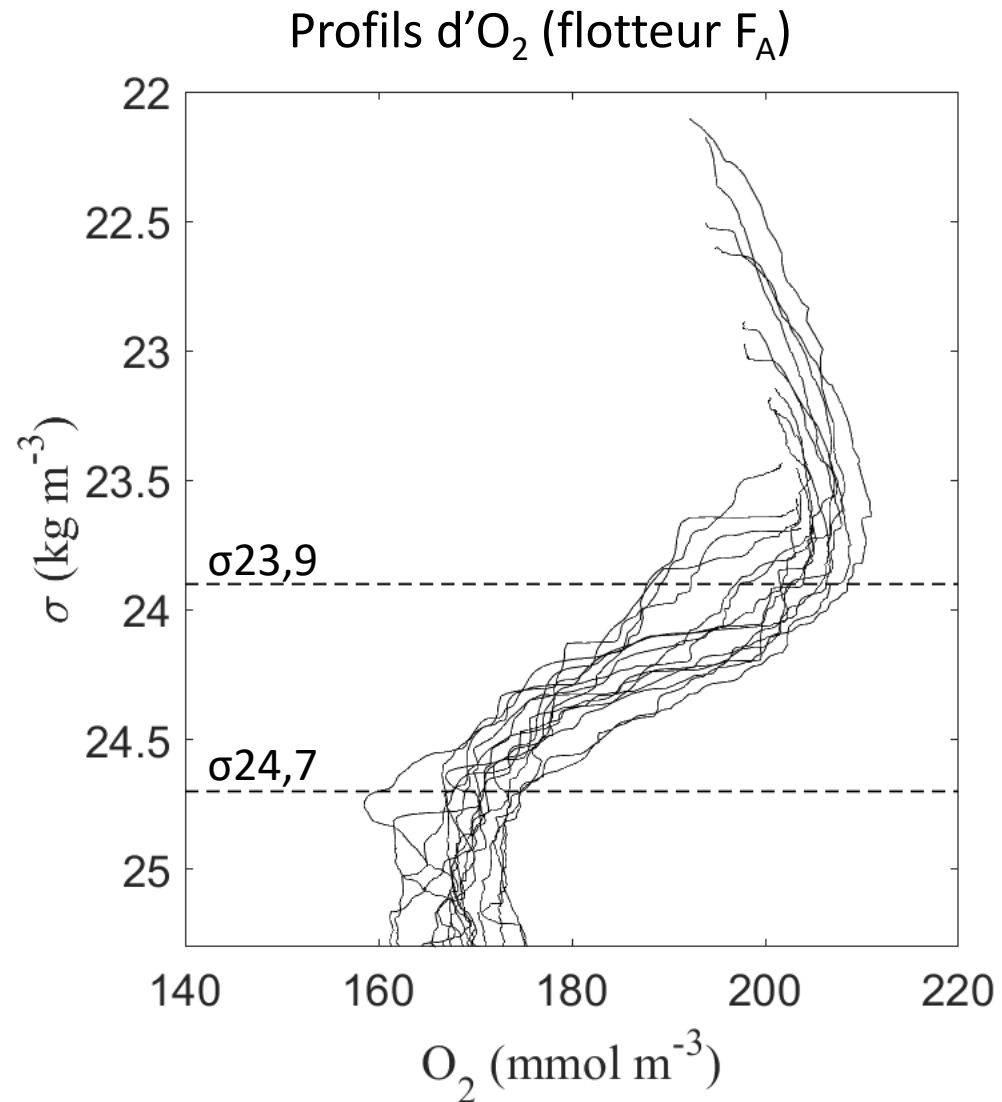
Estimations des $[\text{NO}_3^-]$ avec le réseau de neurones CANYON-B (*Sauzede et al., 2017; Bittig et al., 2018*)

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] \approx 0

→ Diffusion négligeable

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

→ Gradient [O₂] \approx 0

→ Diffusion négligeable