



Rouen,
le 11 juin 2025

Journée PHRESQUES-2

Le suivi haute-fréquence de la qualité de l'eau de la Seine,
de Paris à la mer

Dynamique métabolique de la Seine Francilienne et émissions de CO₂

Escoffier N., Njapou P., Mougin J., Garnier J., Guérin S., Mouchel J.M.



Portage & coordination

Financement

Labélisation

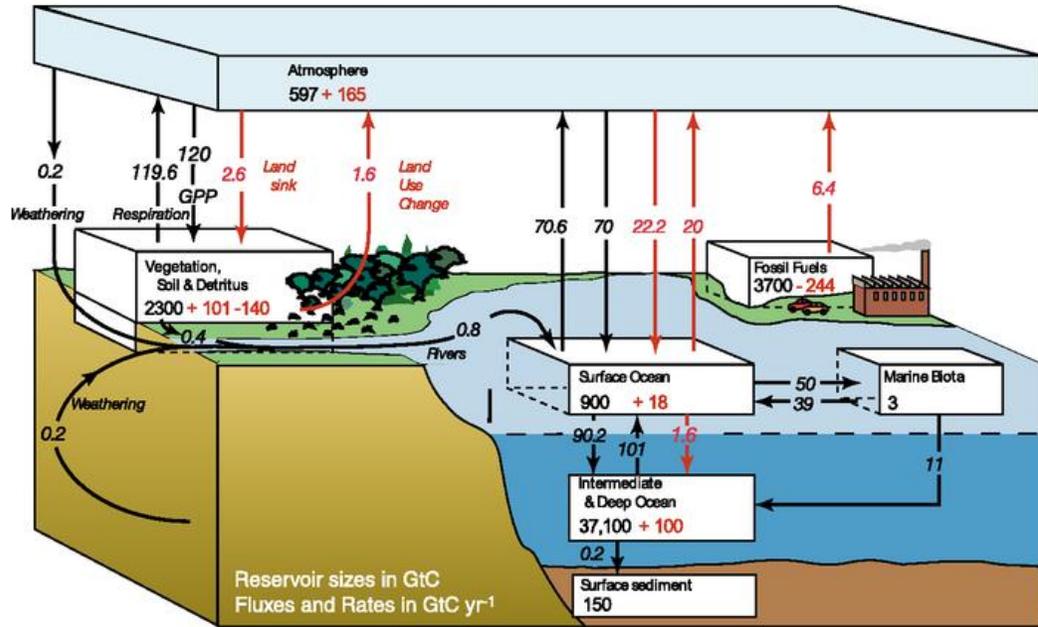
Consortium scientifique



Les eaux continentales dans le cycle du carbone

- **Ecosystèmes aquatiques** ↔ Agents de **couplage** entre les compartiments **terrestres et océaniques**

➤ *Vision passée...*



The global carbon cycle
IPCC AR 4 (2007)

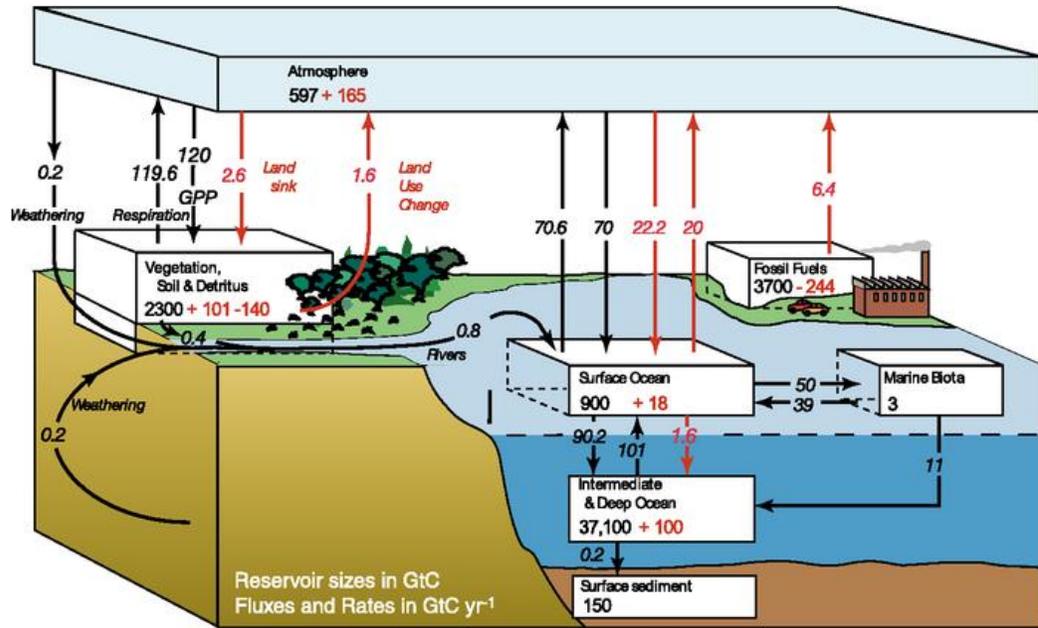
(a) Passive pipe



Les eaux continentales dans le cycle du carbone

- **Ecosystèmes aquatiques** ↔ Agents de **couplage** entre les compartiments **terrestres et océaniques**

➤ *Vision passée...*



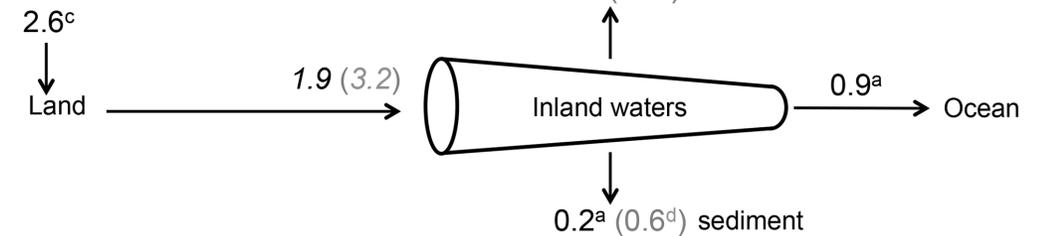
The global carbon cycle
IPCC AR 4 (2007)

Conception actuelle

(a) *Passive pipe*



(b) *Active pipe*



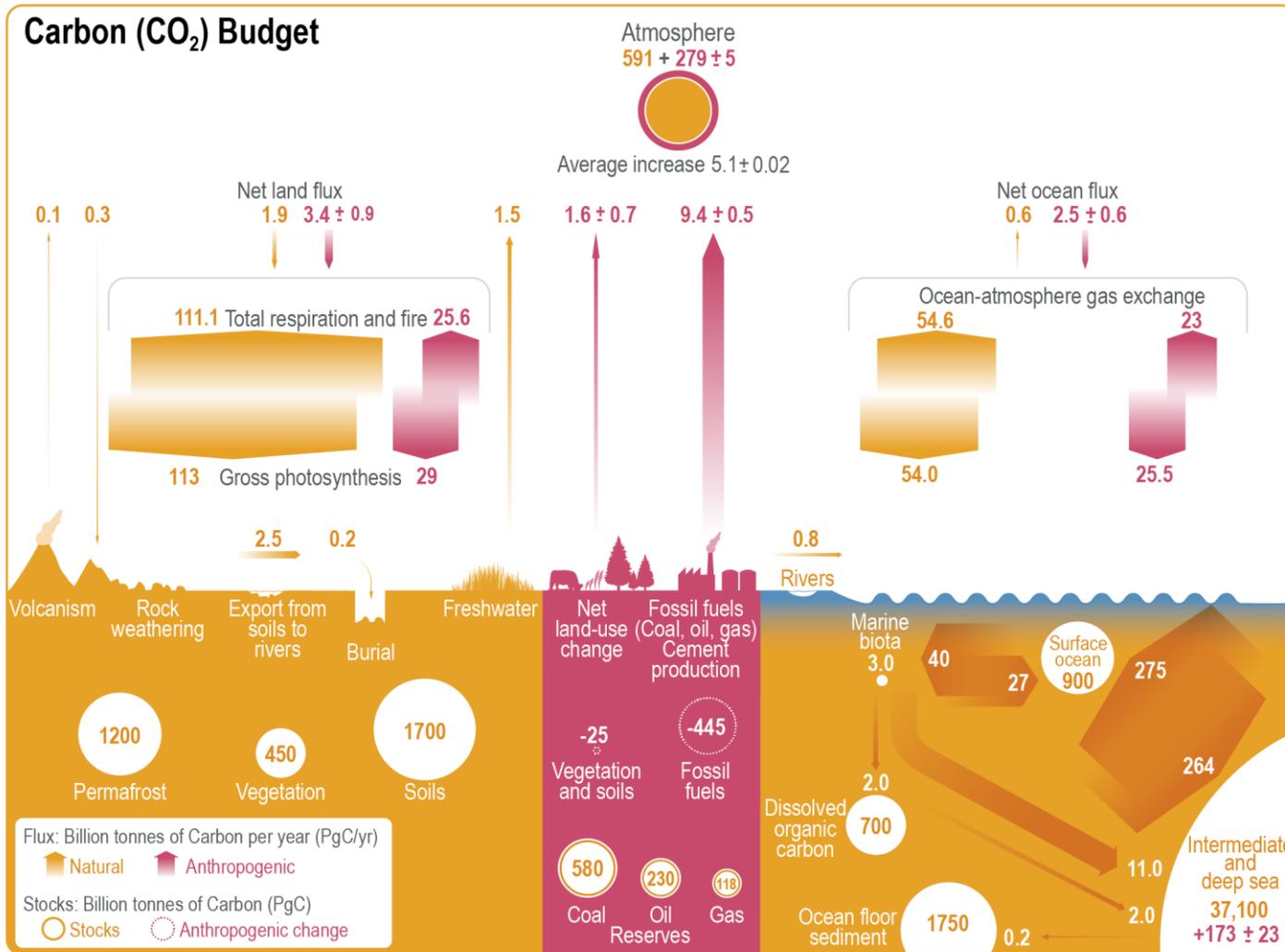
Cole et al (2007)

- **Evolution conceptuelle** des systèmes aquatiques lors **dernières décennies**

- ✓ Globalement **sursaturés en CO₂** ↔ CO₂ du sol + minéralisation MO (allocht. & autochthone)
- ✓ Systèmes aquatiques ~ **0.5% surface terrestre** mais **émissions CO₂ ≈ captage CO₂ océanique**

Les eaux continentales dans le cycle du carbone

➤ The global CO₂ budget, *IPCC AR 6 (2021)*



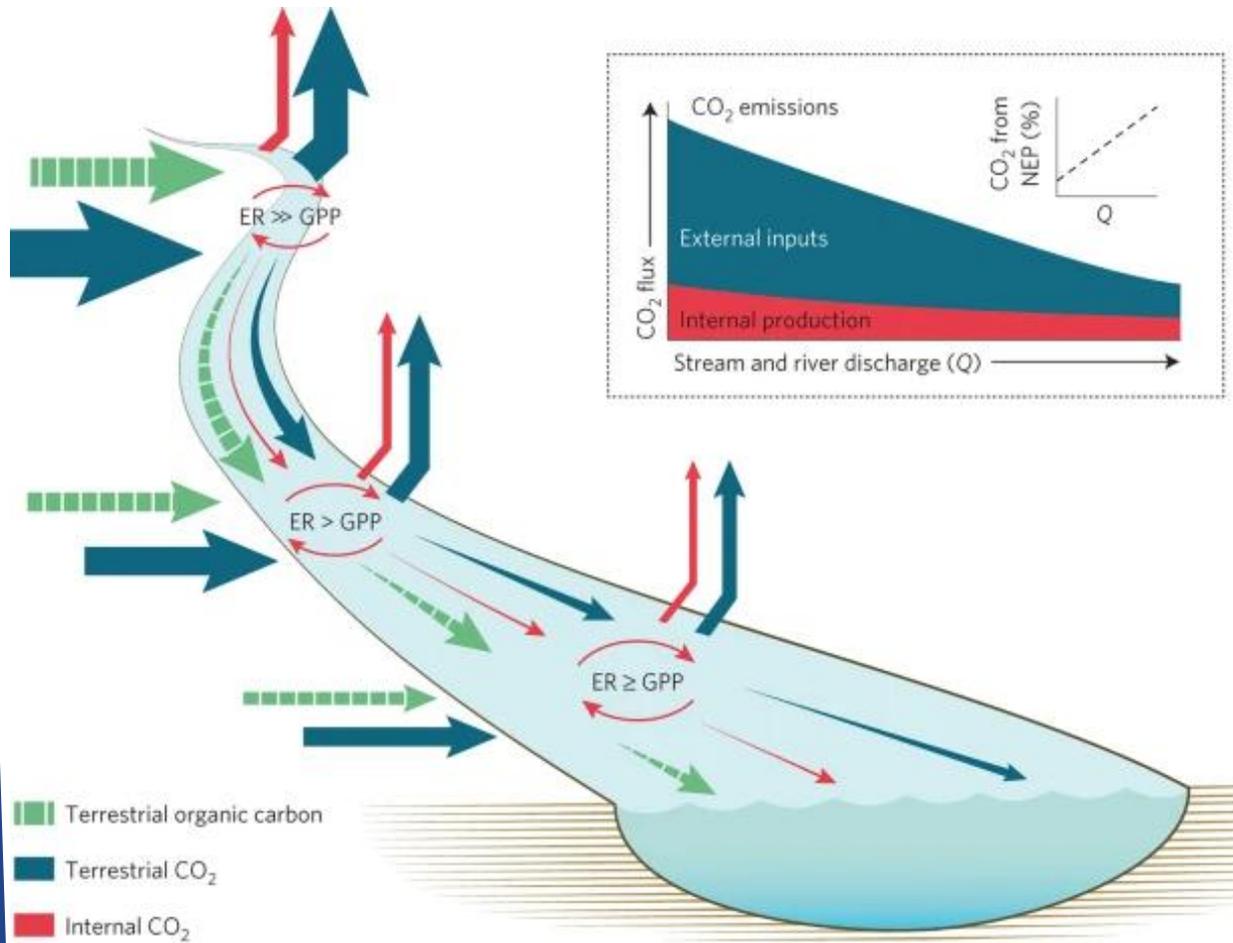
✓ **Intégration des eaux continentales, mais ...**

- Incertitude importante sur flux de CO₂ aquatiques
- Impacts anthropiques sur ces flux non résolus

➤ **Intégration incomplète du fonctionnement des systèmes aquatiques / recyclage du C**

Recyclage du carbone en cours d'eau & rivières

➤ Fonctionnement biogéochimique le long du continuum aquatique (RCC)



Hotchkiss et al. 2015

- **Variations** circadiennes d'O₂ >> **Métabolisme** aquatique (**NEP = GPP + ER**) et conversion du C

- ✓ Profil longitudinal théorique du métabolisme et contribution aux émissions de CO₂

- Apports externes majeurs en amont (petits cours d'eau)
- Recyclage interne (ER & GPP) plus important à l'aval (rivières, fleuves)

- **Cas des systèmes anthropisés tels que la Seine (nutriments, MO, RUTP...)?**



- ❖ **Quantification de la balance métabolique de la Seine Francilienne via l'Observatoire MeSeine**
 - Indicateurs métaboliques (GPP, ER, NEP) à partir des mesures Haute Fréquence (HF)
 - Dynamique métabolique dans le temps (jour, saison, année) & l'espace (amont-aval aggro. Paris)
 - **Métabolisme >> Reflet du fonctionnement et de l'état de qualité de la Seine ?**

- ❖ **Métabolisme >> Intégrateur du recyclage biogéochimique du C**
 - Lien entre métabolisme et émissions de CO₂ d'un fleuve fortement anthropisé
 - ***Comment intégrer l'ensemble des processus organiques et inorganiques de conversion du carbone ?***

Observatoire MeSeine de la Seine Francilienne

➤ 2 axes opérationnels

- **Prélèvements *in situ* et analyses**
surveillance bon état physico-chimique et chimique (14 sites, hebdo.)

- **Mesures en continu *in situ*** (9 sites)

 Station oxygène dissous

 Station multi-paramètres

✓ **Données HF ⇔ [1995 – 2025]**

Qualification métrologie *in situ* & algorithmes correction chroniques a posteriori



 SIAAP intervention Zone

 River

 Waste water treatment Plants

 Combined Sewer Overflows

 OD + temperature site

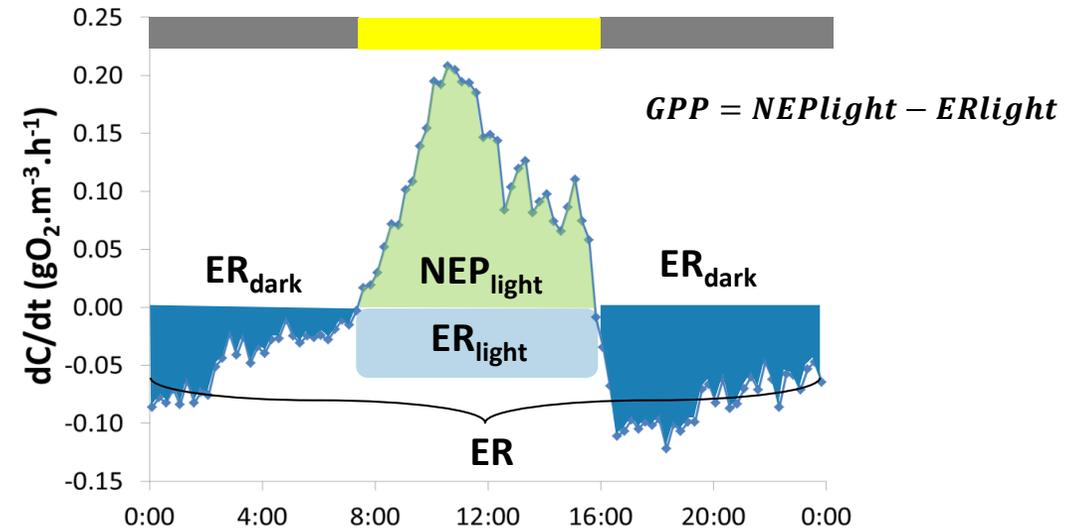
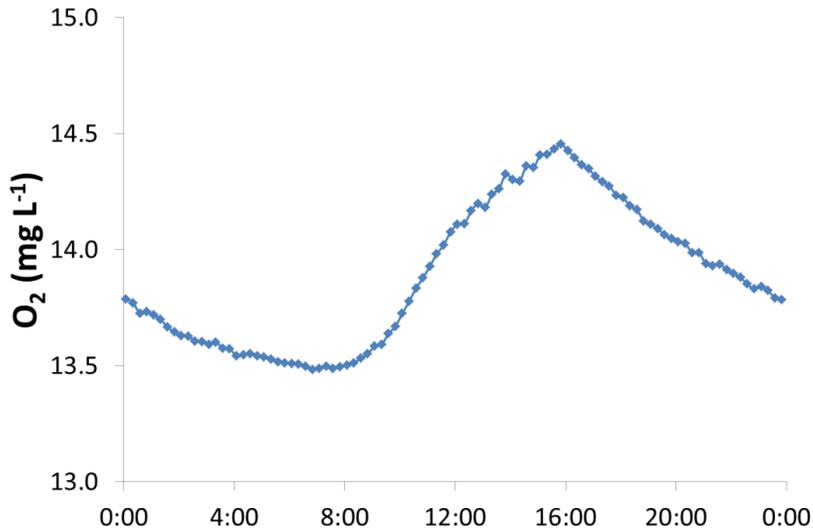
 OD + temperature + Multiparametric site



Quantification des indicateurs métaboliques en Seine

- ✓ **Méthode des courbes journalières d'O₂** *Odum, 1956*
- Variation instantanée du taux d'oxygène dissous en Seine:

$$\frac{dO_2}{dt} = GPP_t + ER_t \pm F_t \quad \longleftrightarrow \quad F_t = K * (O_{2\ sat(t)} - O_{2(t)})$$

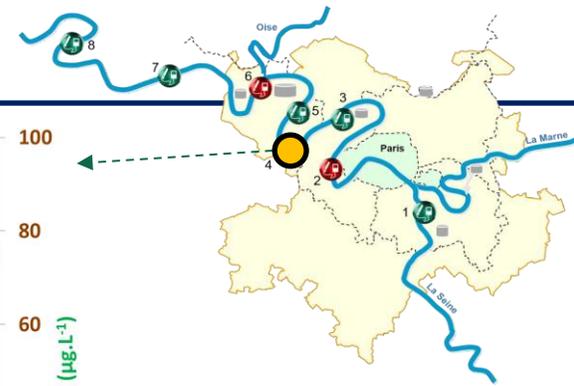


➤ Intégration journalière \longleftrightarrow $NEP = GPP + ER$

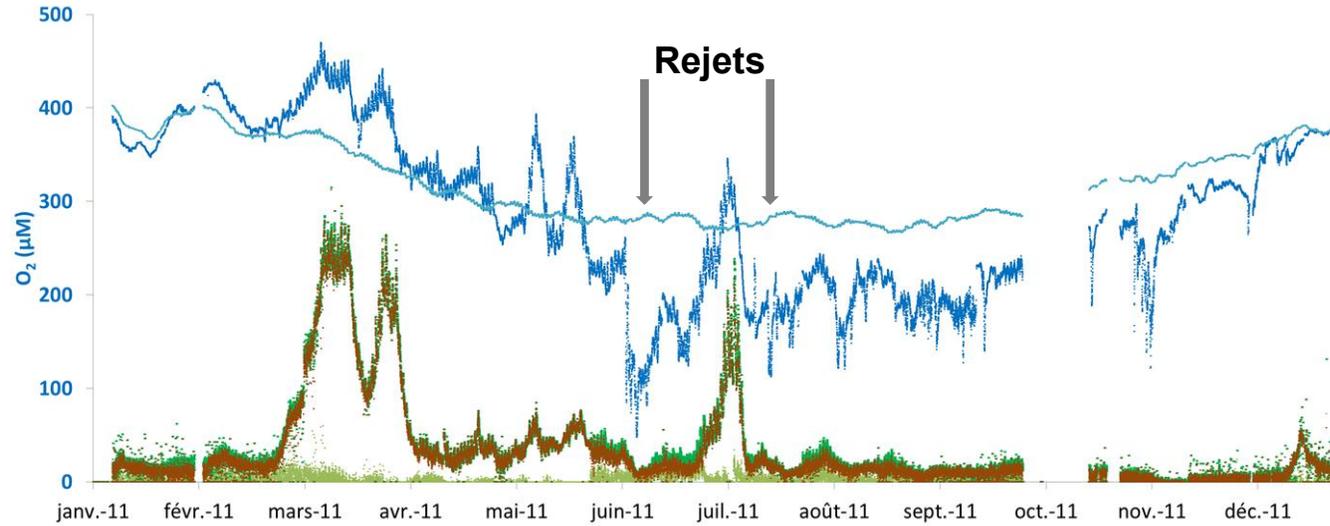
Autotrophie ($NEP > 0$) \Leftrightarrow Puits de C / atmosphère
Hétérotrophie ($NEP < 0$) \Leftrightarrow Source de C



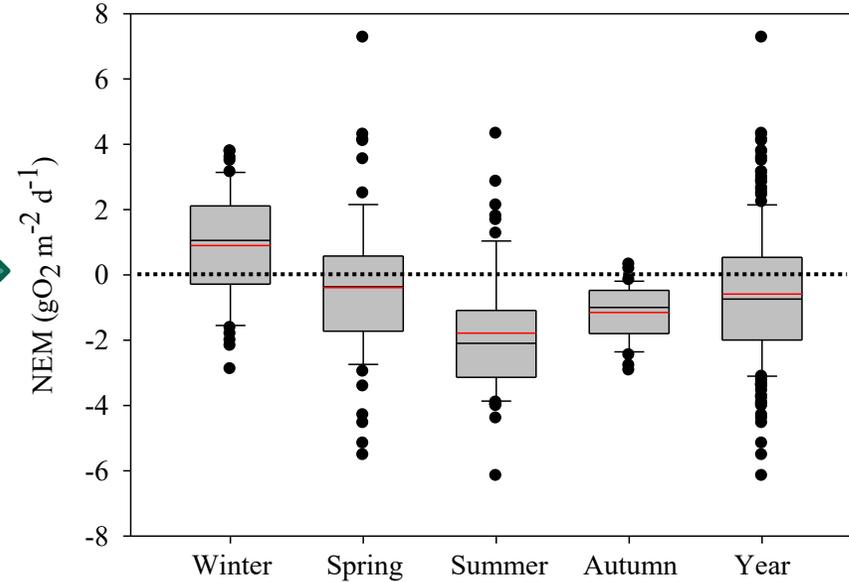
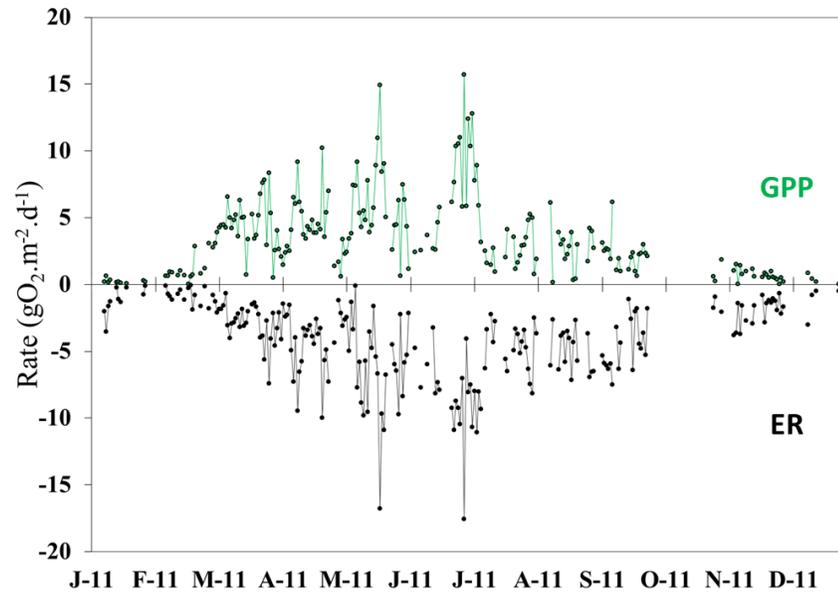
Dynamique temporelle du métabolisme en Seine



➤ *Bougival (2011)*



Escoffier et al. 2016

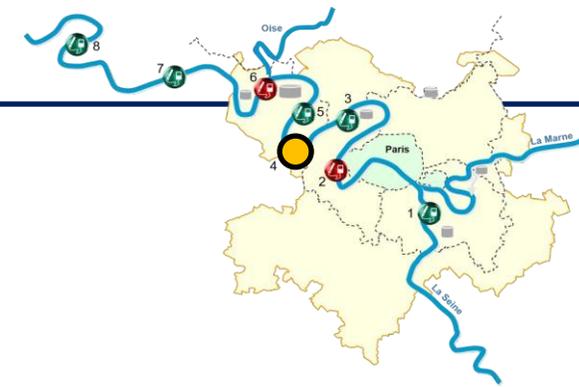


• **Variabilité métabolique journalière** ⇔ Blooms phyto / RUTP & Hydrologie

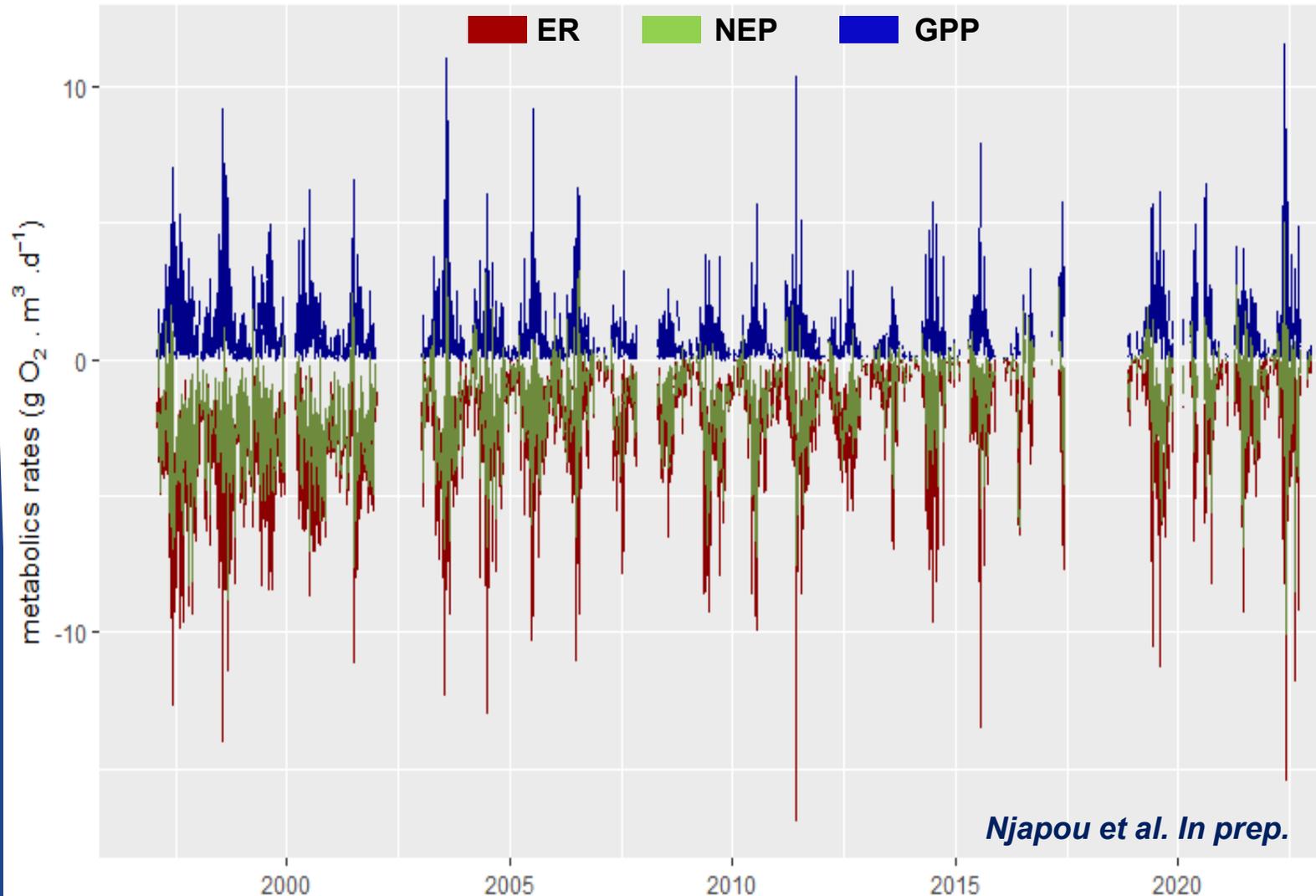
• **Hétérotrophie annuelle (NEP < 0)** ⇔ **265 gC m⁻² an⁻¹ (CO₂)** ... mais **Autotrophie Saisonnière**



Dynamique temporelle du métabolisme en Seine



➤ Taux métaboliques journaliers à Bougival: [1997 – 2022]



✓ **Excellente couverture sur période**

✓ **Dynamique saisonnière mais forte variabilité interannuelle**

• Valeurs moyennes annuelles:

GPP [$0.3 - 1.6$] $\text{gO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ j}^{-1}$

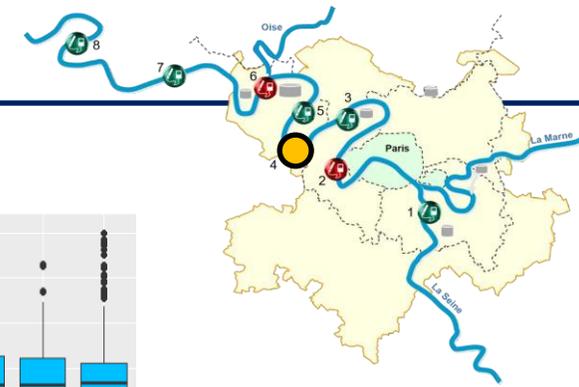
ER [$-4.3 - 0.9$]

NEP [$-3.3 - 0.4$]

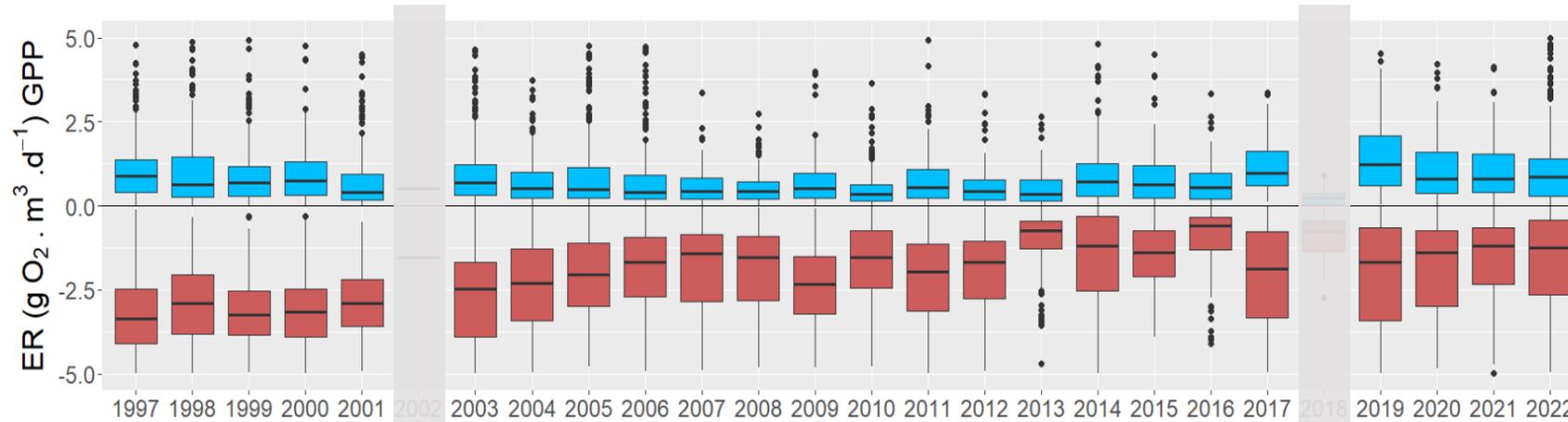
➤ **Dynamique métabolique à long terme ?**



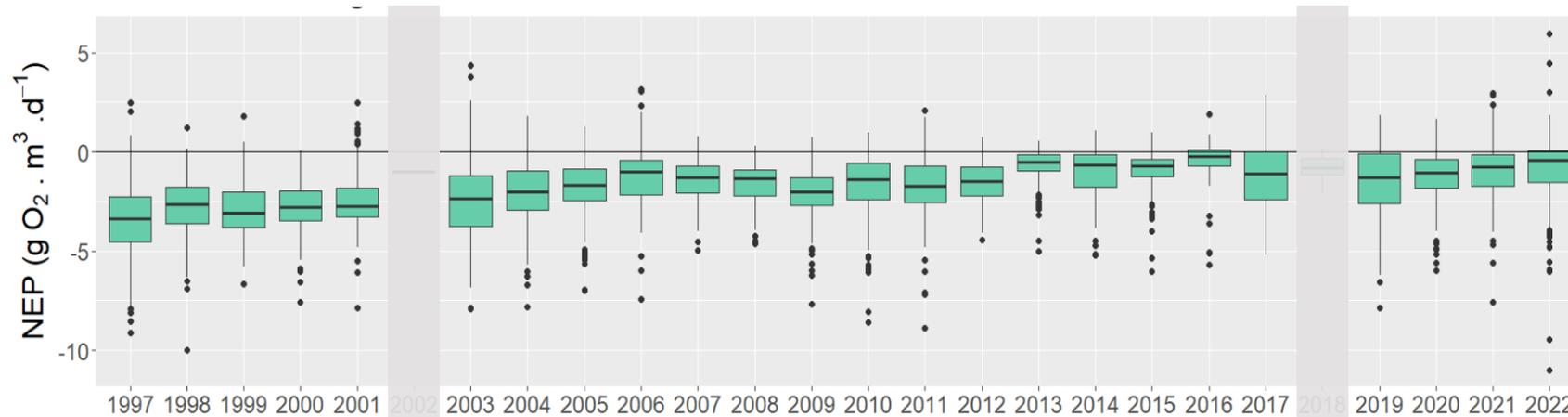
Dynamique temporelle du métabolisme en Seine



➤ Taux métaboliques annuels moyens à Bougival >> [1997 – 2022]



Njapou et al. In prep.



✓ **Hétérotrophie moyenne annuelle >> Atténuation sur années récentes**

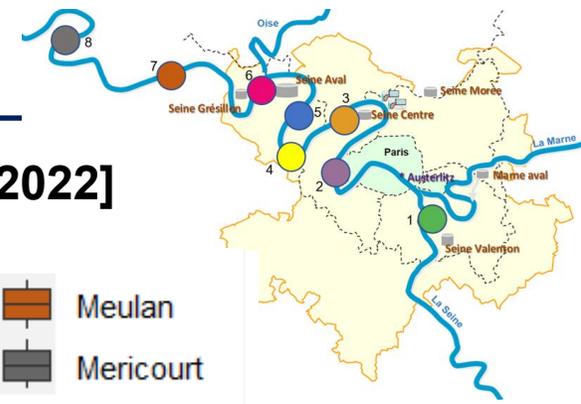
➤ **Réduction ER / GPP ⇔ Evolution Qualité & Diminution apports MO externes ?**

➤ **Représentativité Bougival à l'échelle du continuum ?**

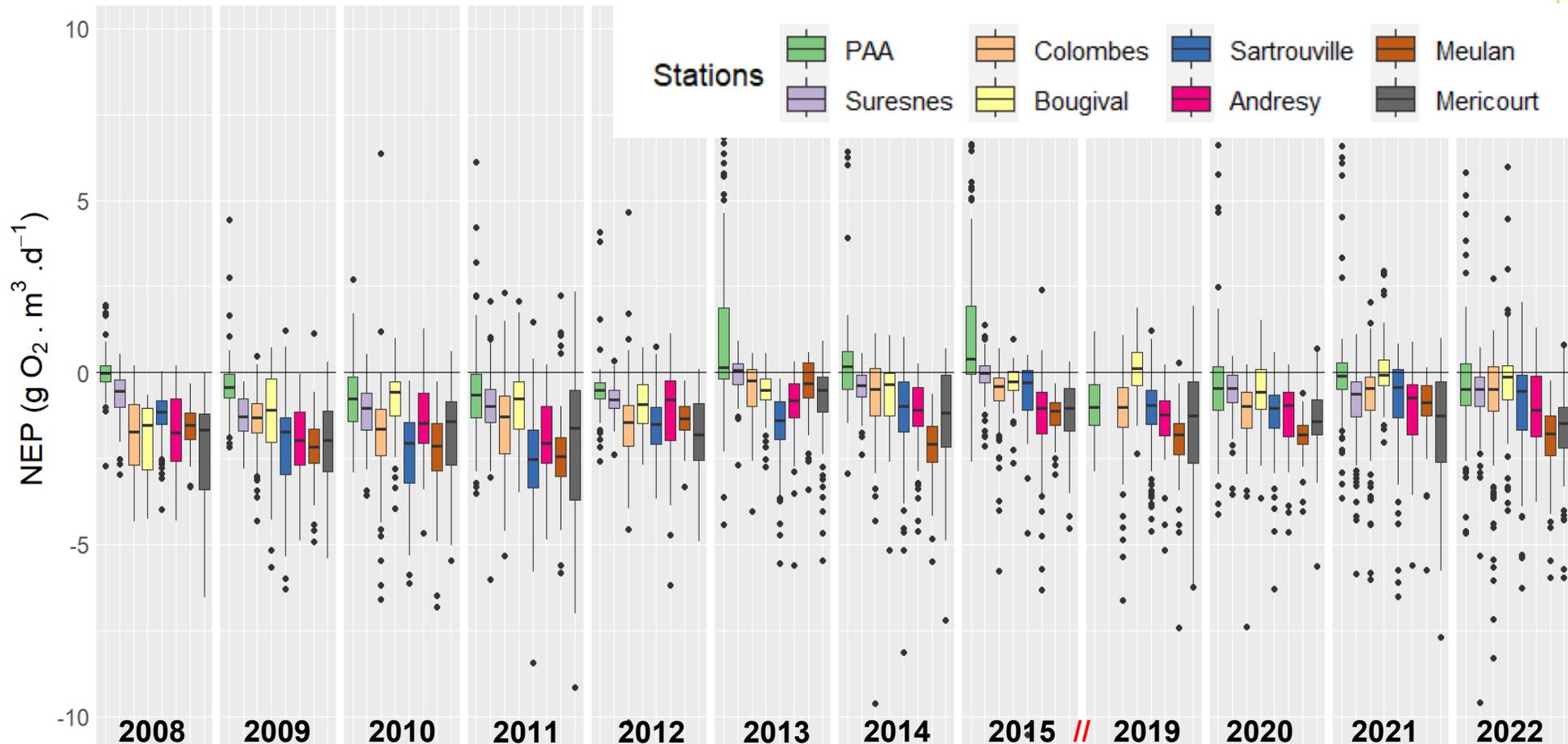
, 11 juin 2025



Profil métabolique longitudinal en Seine



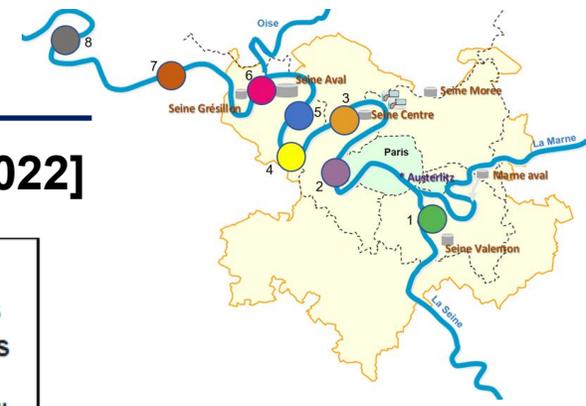
➤ Evolution interannuelle moyenne métabolisme amont >> aval [2008 – 2022]



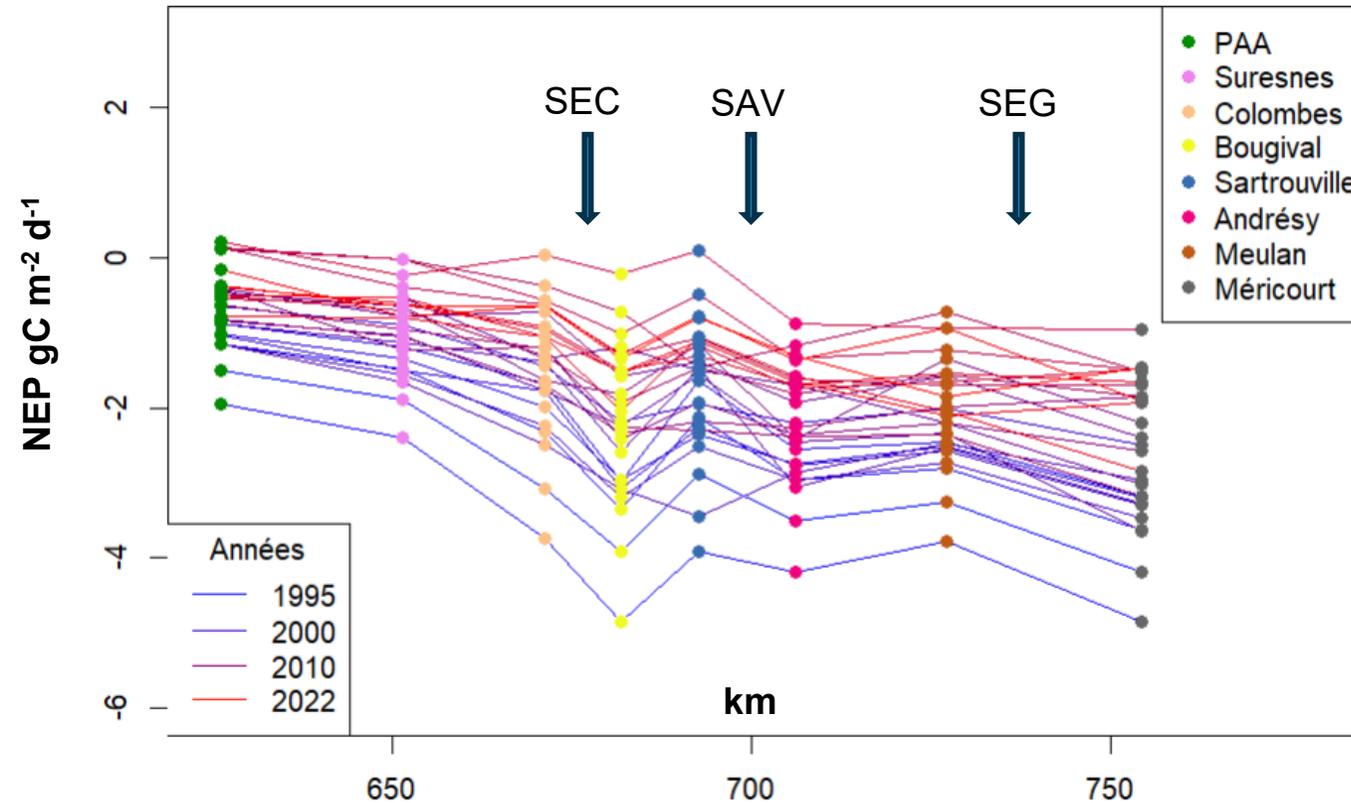
- Impact agglomération ⇔ Accentuation de l'hétérotrophie vers l'aval >> rejets urbains
- Mais atténuation récente effet aggro. ⇔ Réduction du gradient NEP amont - aval



Profil métabolique longitudinal en Seine



➤ Evolution long terme du gradient métabolique amont >> aval [1995 – 2022]



✓ Réduction gradient hétérotrophie ⇔ Améliorations assainissement & qualité du milieu récepteur

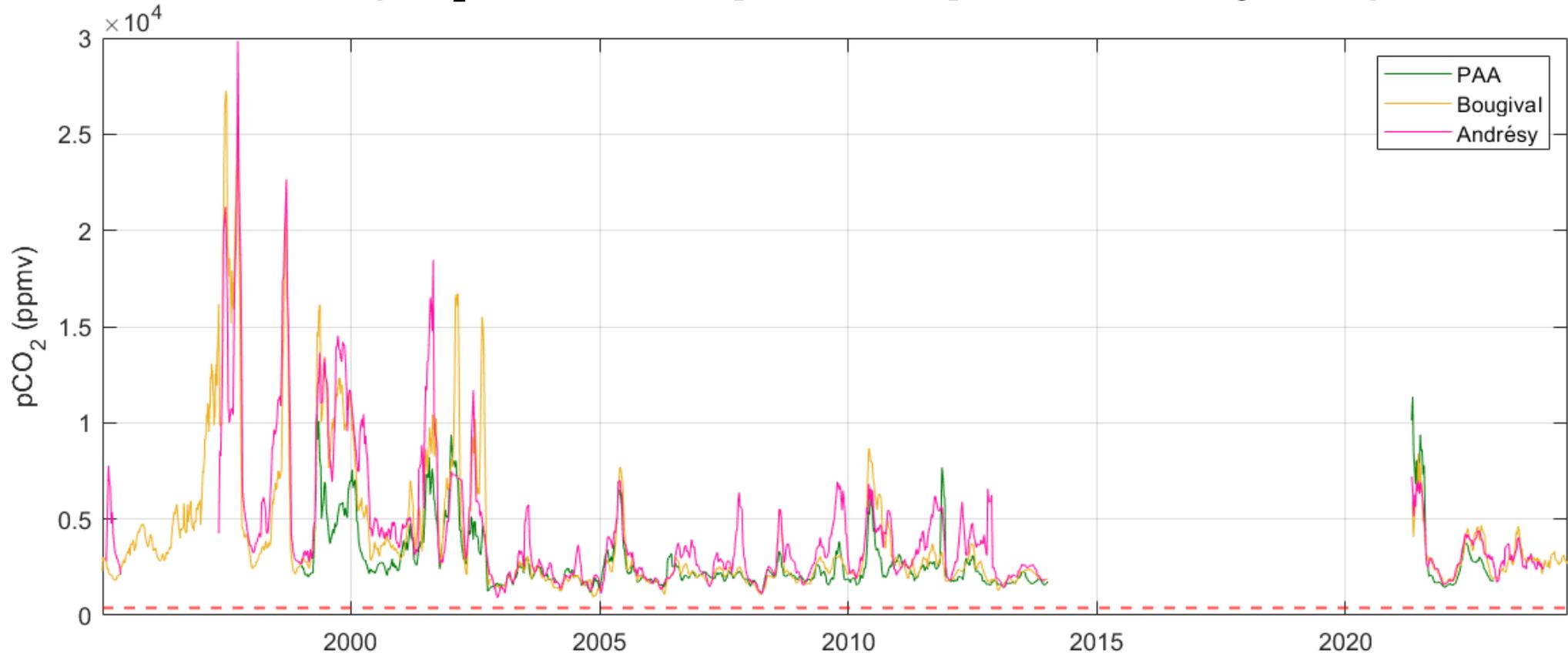
- Mais NEP dépendant couples ER/GPP propres à chaque site

➤ Drivers métaboliques ≡ Pressions locales & conditions hydro-bio-géomorphologiques

➤ *Lien entre évolution métabolique et dynamique du CO₂ ?*

Dynamique de la pCO₂ en Seine

- Estimation de la pCO₂ amont >> aval [1995 – 2022] via données long terme pH / Alcalinité



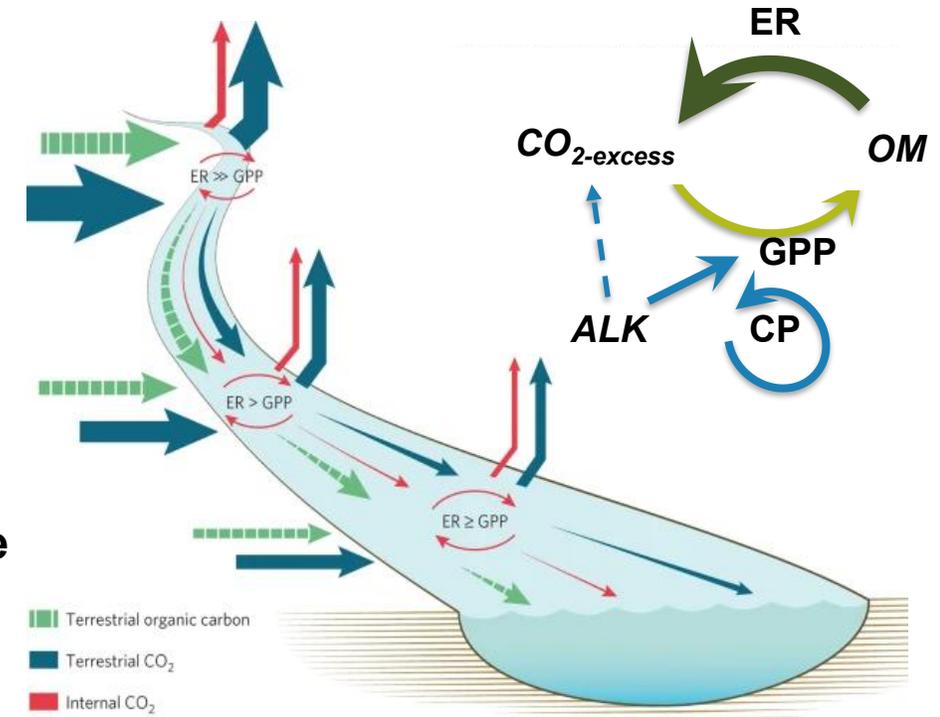
- ✓ Diminution sursaturation en CO₂ cohérente avec évolution métabolisme
- ✓ Dynamique saisonnière ⇔ Fonctionnement métabolique de la rivière ...
- ...mais sursaturation permanente avec gradient amont-aval moins marqué

- *Alcalinité en Seine et système carbonates à contraindre pour décrire lien métabolisme & CO₂*

Métabolisme et processus du Carbone Inorganique

➤ Vers une résolution couplée de la dynamique métabolique et flux de C en milieux aquatiques alcalins

- Majorité cours d'eau (> Ordre 3) sont alcalins
 >> $CID \simeq \text{Alcalinité}$
- Métabolisme organique
 >> Emissions directes CO_2 / spéciation géochimique
 CID & CIP



➤ Approche multi-capteurs HF ⇔ Intégration processus & flux à l'échelle du continuum

- Métabolisme C organique ⇔ Méthode courbes O_2 → $NEP = GPP + ER$
- Dynamique C inorganique & systèmes carbonates
 - Conductivité @ 25 °C ⇔ Proxy Alcalinité
 - {Alk | pH} >> CID & pCO_2 @ HF

$$NEPc(t) = \frac{dDIC}{dt} - \text{Calcif.}(t) \pm FCO_2(t)$$



Conclusions & perspectives

❖ Mesures Haute Fréquence ⇔ Caractérisation dynamique spatio-temporelle du métabolisme Seine francilienne

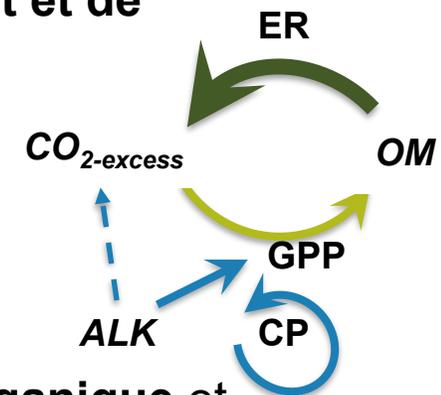


✓ Métabolisme ⇔ Descripteur du recyclage du carbone organique à pas de temps fin

✓ Intégrateur spatial des pressions anthropiques et miroir du fonctionnement et de l'amélioration de la qualité de l'eau

➤ Contribution à la dynamique des émissions de CO₂ mais lien à affiner ...

➤ ... Observations HF complémentaires ⇔ Mécanismes entre métabolisme organique et processus C inorganique ⇔ Etudier gradient de conditions environnementales à l'échelle du bassin



Merci de votre attention

