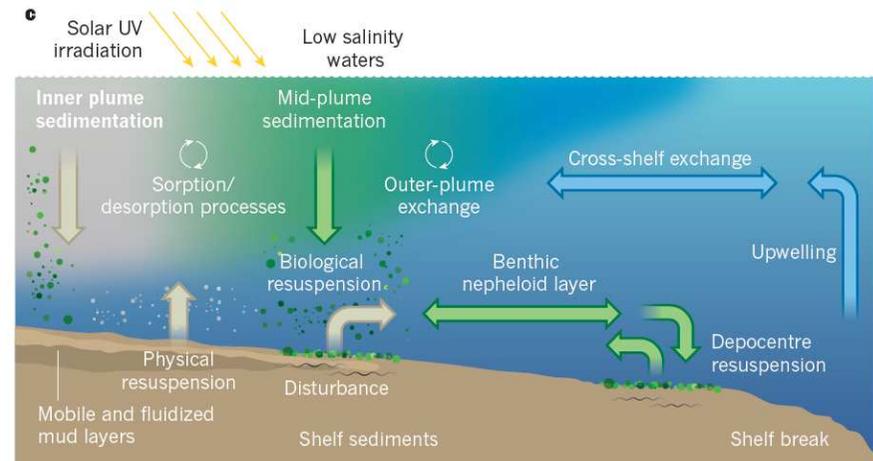
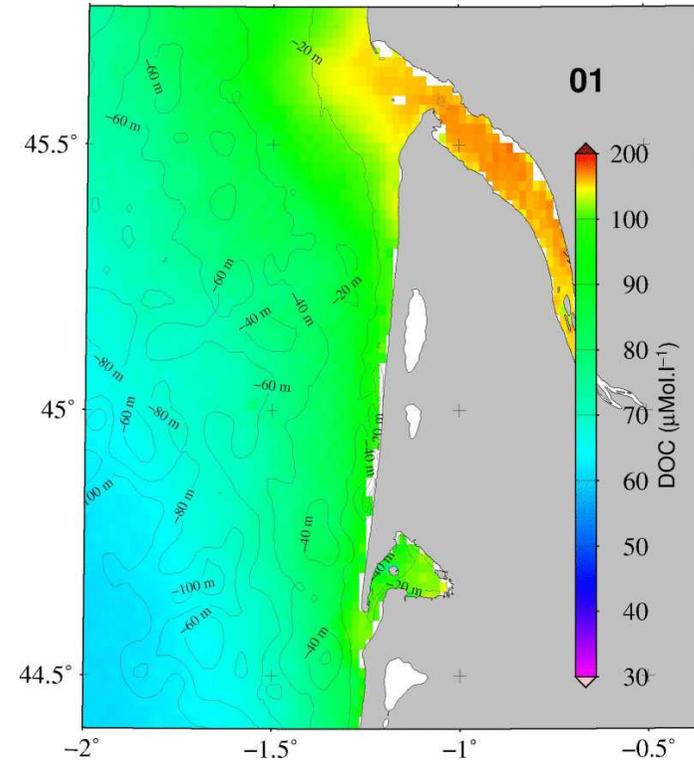


# Apport de la télédétection de la couleur de l'océan pour le suivi de paramètres biogéochimiques des eaux côtières.

Hubert Loisel

V. Vantrepote, D. Dessailly, F. Steinmetz, D. Ramon



En raison des larges gammes d'échelles temporelles couvertes, les observations satellites de la couleur de l'eau (OCR) peuvent apporter des informations essentielles à l'étude des cycles biogéochimiques des milieux côtiers.

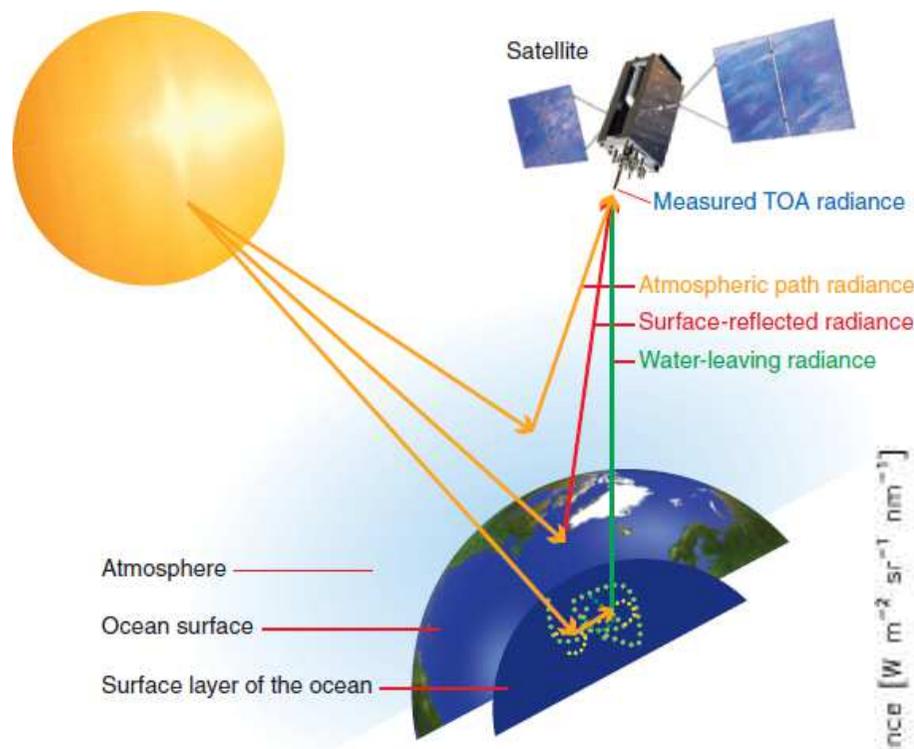
## Quelles sont les échelles appréhendées ?

**Moyennes résolutions temporelles (la journée) et spatiales (300m – 1 km) sont couvertes par les satellites couleurs « standards »: SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS, OLCI (couverture continue depuis Sept 1997)**

**Disponibilité récente (2013) de la haute résolution spatiale (20-30 m) avec une relativement bonne définition spectrale et radiométrique mais relativement faible couverture temporelle (15 jours) – OLI (Landsat 8), MSI (Sentinel 2)**

**Les missions Sentinel du programme Copernicus permettent d'améliorer la couverture temporelle (Sentinel 2a et b: 6 jours).**

De part la complexité bio-optique des eaux côtières, un grand effort de développement algorithmique pour la couleur de l'eau a été entrepris cette dernière décennie

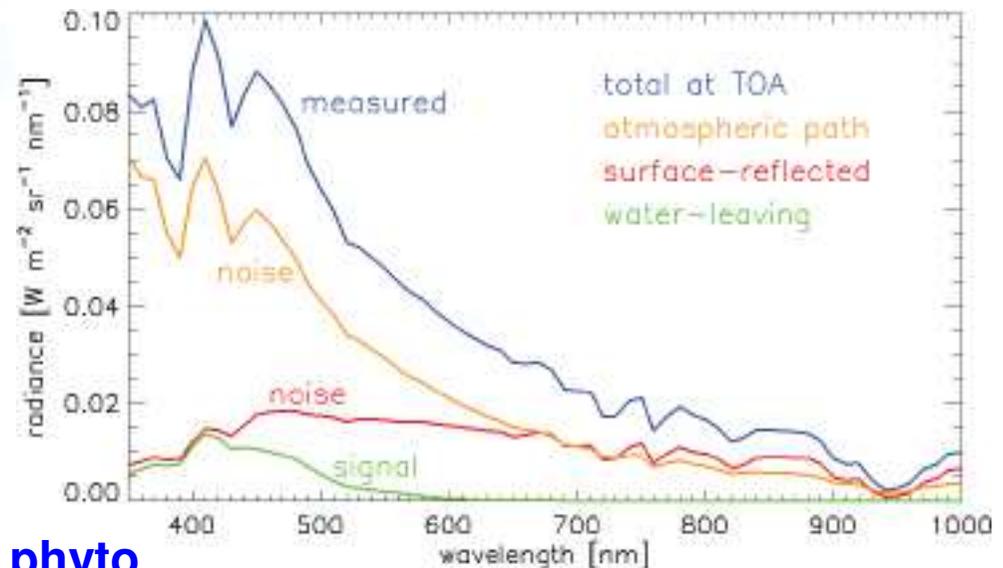


## 1) Corrections Atmosphériques

TOA signal  $\rightarrow$  marine reflectance ( $R_{rs}$ )

## 2) Algorithmes bio-optiques

$R_{rs}$   $\rightarrow$  biogéochimie



**Paramètres estimés:**  
**Chl, MES, DOC, POC, IOPs, groupes phyto**

Des approches nouvelles pour les CA ont récemment été développées, se basant soit sur l'utilisation du SWIR, ou alors en adoptant des concepts algorithmiques nouveaux.

$$\rho_{\text{TOA}}(\lambda) = t_{\text{oz}}(\lambda) \cdot [\rho_{\text{mol}}(\lambda) + T(\lambda)\rho_{\text{gli}} + \rho_{\text{aer}}(\lambda) + \rho_{\text{coupl}}(\lambda) + t(\lambda)\rho_w^+(\lambda)]$$

**Ce qui est mesuré**      **L'inconnu principal pour les corrections atmosphériques**      **Ce qu'on veut**

$$\rho_{\text{ag}}(\lambda) = \Delta\rho_{\text{gli}}(\lambda) + \rho_{\text{aer}}(\lambda) + \rho_{\text{coupl}}(\lambda)$$

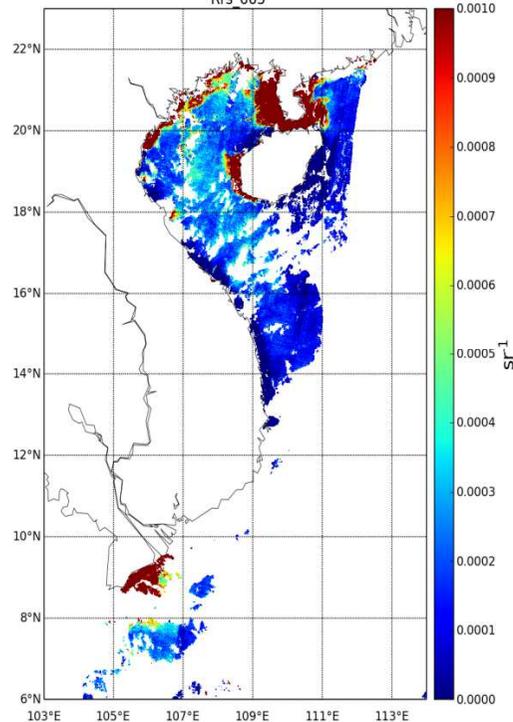
- L'approche standard est basée sur l'exploitation du NIR, de "Look-up table" d'aérosols, et sur l'extrapolation de cette information aérosols du NIR vers le visible.
- L'approche POLYMER (Steinmetz et al., 2011), basée sur une décomposition polynomiale et sans famille d'aérosols. a été adaptée pour les eaux côtières

$$\rho_{\text{ag}}(\lambda) \approx T_0(\lambda)c_0 + c_1\lambda^{-1} + c_2\lambda^{-4}$$

En comparaison avec le traitement standard (SeaDAS/NASA) l'approche développée dans GLobCoast permet d'augmenter la résolution spatiale (et temporelle) avec une performance radiométrique similaire.

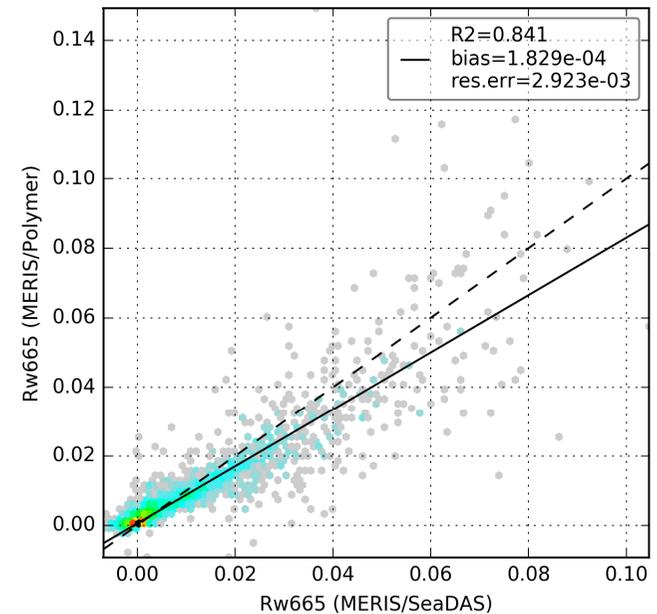
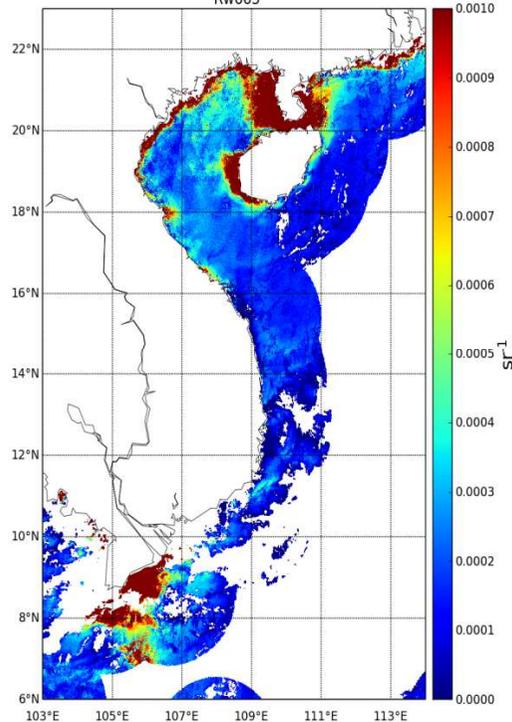
### Traitement SeaDAS

MERIS\_NASA/2002/M2002\_169\_176\_Rrs\_665\_Regrid6\_23\_103\_114.hdf  
Rrs 665

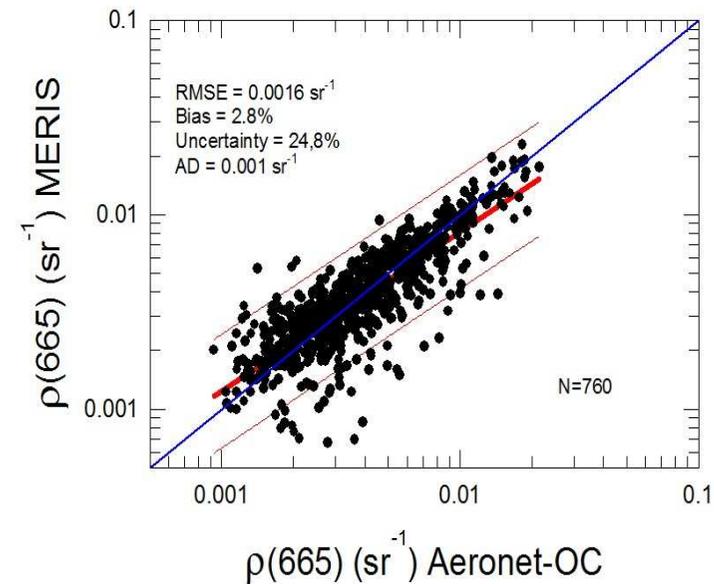
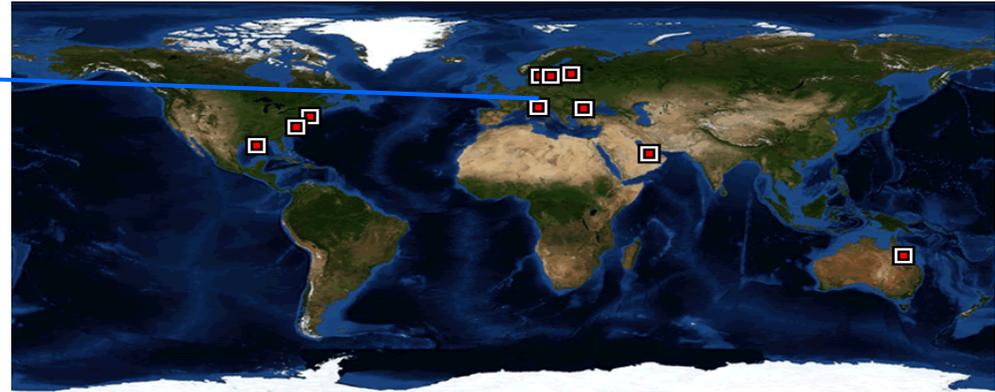


### Traitement GlobCoast

MERIS/2002/MER\_RR\_1PRACR2002\_169\_176\_Rw665\_Regrid6\_23\_103\_114.hdf  
Rw665



La disponibilité croissante de mesures in situ (automatisées ou non) contribue à l'essor de l'OCR pour l'étude du milieu côtier.



Aerosol Robotic Network for ocean color (AERONET-OC)

De nombreux paramètres bio-optiques et biogéochimiques peuvent actuellement être estimés dans les eaux côtières avec une relativement bonne précision.

### *Algorithmes matures*

- IOPs (proxy de grandeurs biogéochimiques)
- Turbidité
- MES
- Chla
- DOC dominée par les apports terrigènes

### *En cours de développement*

- POC
- PIM et POM
- DOC « phytoplanktonique »

De nombreuses approches, basées sur des hypothèses différentes, ont été développées pour estimer Chl au niveau des zones côtières.

- Carder et al., 2009 semi-analytical/empirical 675 nm  
 $Chla = w[Chl]_{sa} + (1-w)[Chl]_{emp}$ ; and  $w = [0.03 - a_{ph}(675)] / 0.015$
- Tassan (1994) empirical approach (443/555) and (412/490)
- Cannizarro and Carder (2006) empirical approach visible and red bands
- Siswanto et al., (2011) empirical based on the Tassan's formulation
- Dall'Olmo et al., 2003; Gitelson et al., (2009); Gurlin et al. (2011) empirical based on red and NIR bands
- D'Alimonte et al. (2012) MLP all bands
- Gohin et al. (2002) semi-analytical all bands
- Brewin et al. (2015) – semi-analytical  $a_{ph}(676)$  (GIOPs) and assumption on the  $a_{ph}^*(676)$  value

+ Review for the detection of phytoplankton blooms (not only Chl) has been done by Blondeau-Patissier et al. (2014)

L'algorithme OC5, qui a montré de bonnes performances en différentes régions côtières, est un bon candidat pour estimer la concentration en chlorophylle-a, Chla.

➤ *The Ganges Delta, Bay of Bengal and Arabian Sea*

*Tilstone et al., 2009, 2011*

➤ *Bay of Biscay*

*Novoa et al., 2012*

➤ *The Rhone river plume* *Fontana, et al., 2009*

➤ *The Ligurian and Tyrrhenian seas*

*Lapucci et al., 2012*

➤ *The Alboran sea*

*Gomez-Jakobsen et al., 2016*

➤ *Baltic sea*

*Pitarch, et al., 2016*

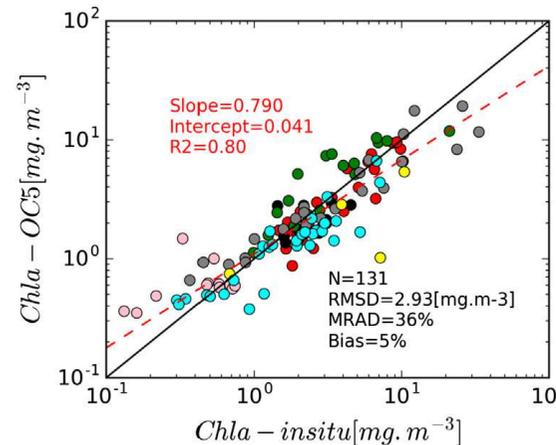
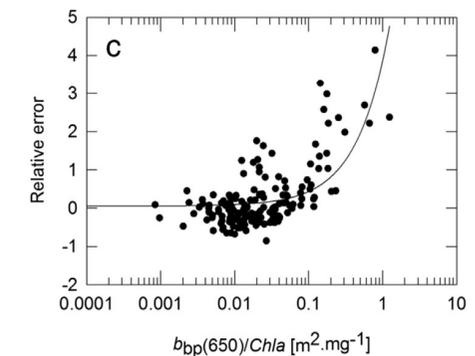
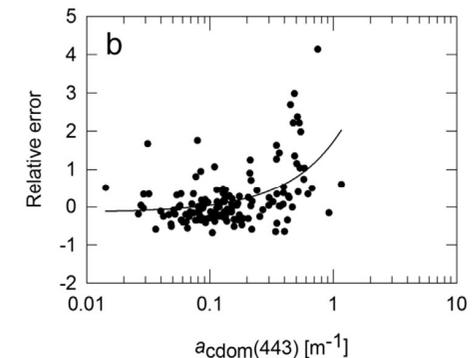
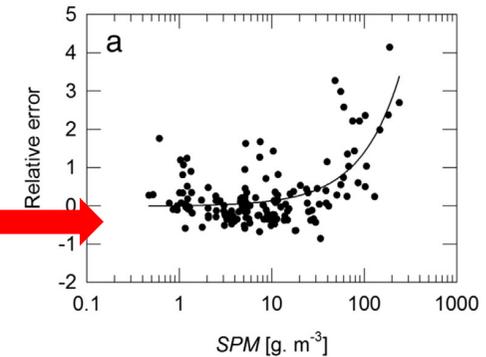
➤ *Vietnam coastal waters*

*Loisel et al., 2017*

➤ *Rio de la Plata: does not work*

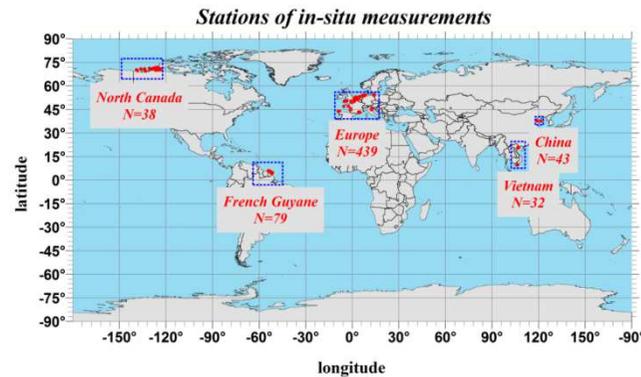
*Camiolo et al., 2016*

Erreur croissante à partir de MES > 60 g.m<sup>-3</sup>

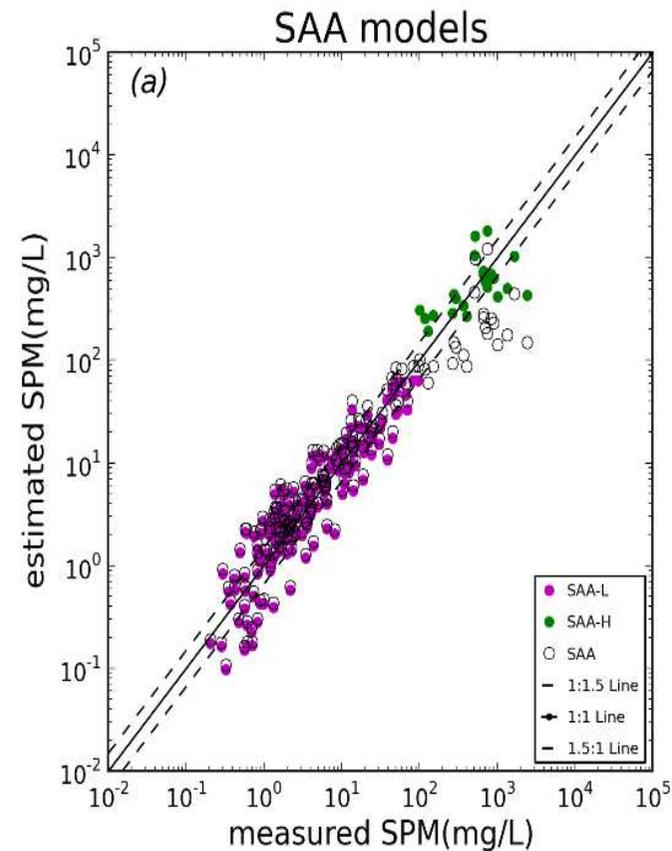
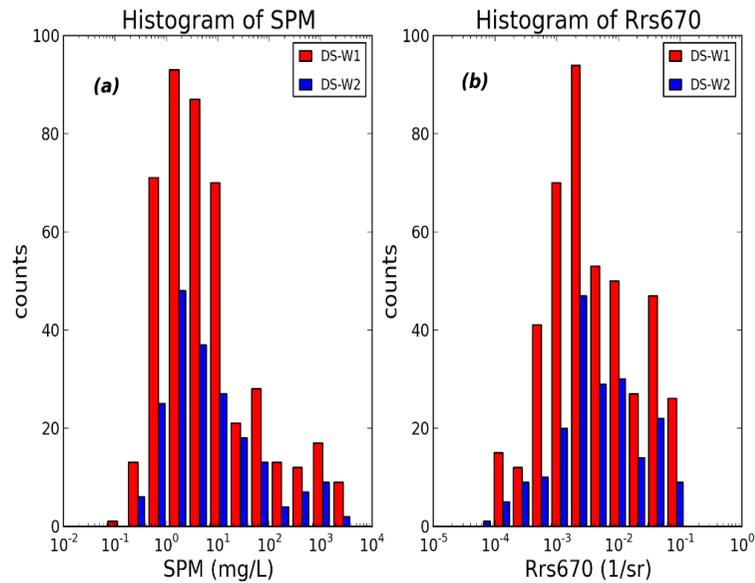


*Loisel et al., 2017*

# Les approches semi-analytiques permettent d'estimer la MES sur 4 ordres de grandeur.

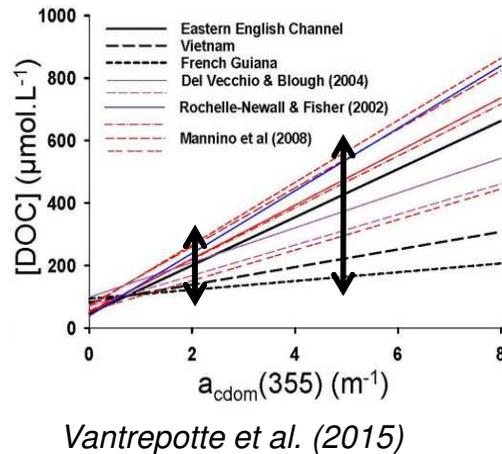


$$SPM = A^{\rho} \cdot \rho_w(\lambda_0) / (1 - \rho_w(670)) / C^{\rho}$$



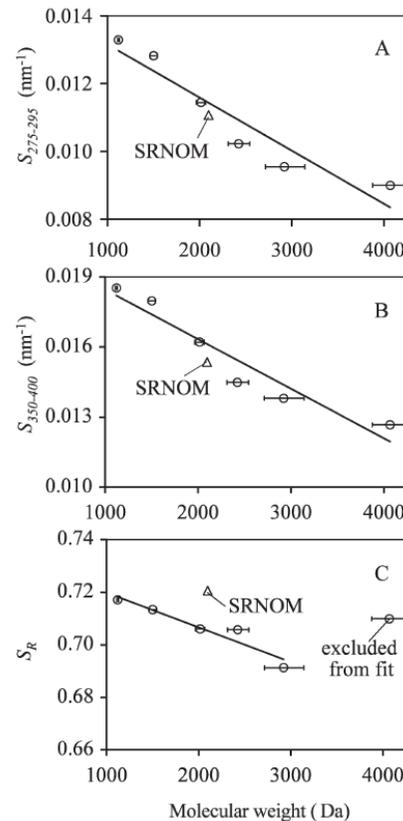
Contrairement à l'océan ouvert, le DOC peut maintenant être estimé en milieux côtier, en particulier quand il est d'origine terrigène.

DOC vs. CDOM have been largely documented but highly variable

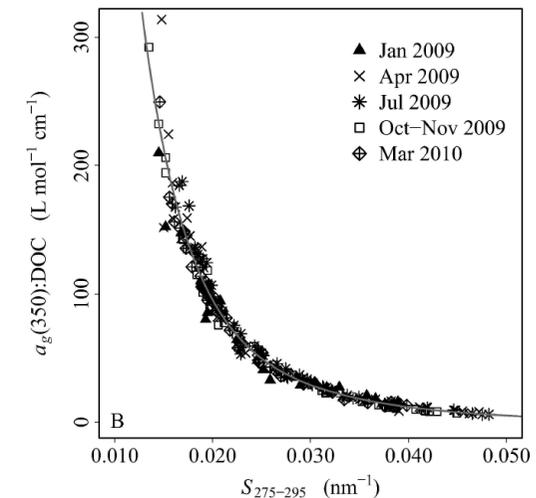


G. M. Ferrari, (2000); Del Vecchio and N. V. Blough, (2004); Guéguen, et al. (2005); Del Castillo and R. L. Miller (2008); Mannino et al. (2008); Lopez, et al. (2012); L. Yang et al., (2013); Rochelle-Newall et al., (2014).

CDOM slope in the UV domain represents a relevant indicator of DOM molecular weight

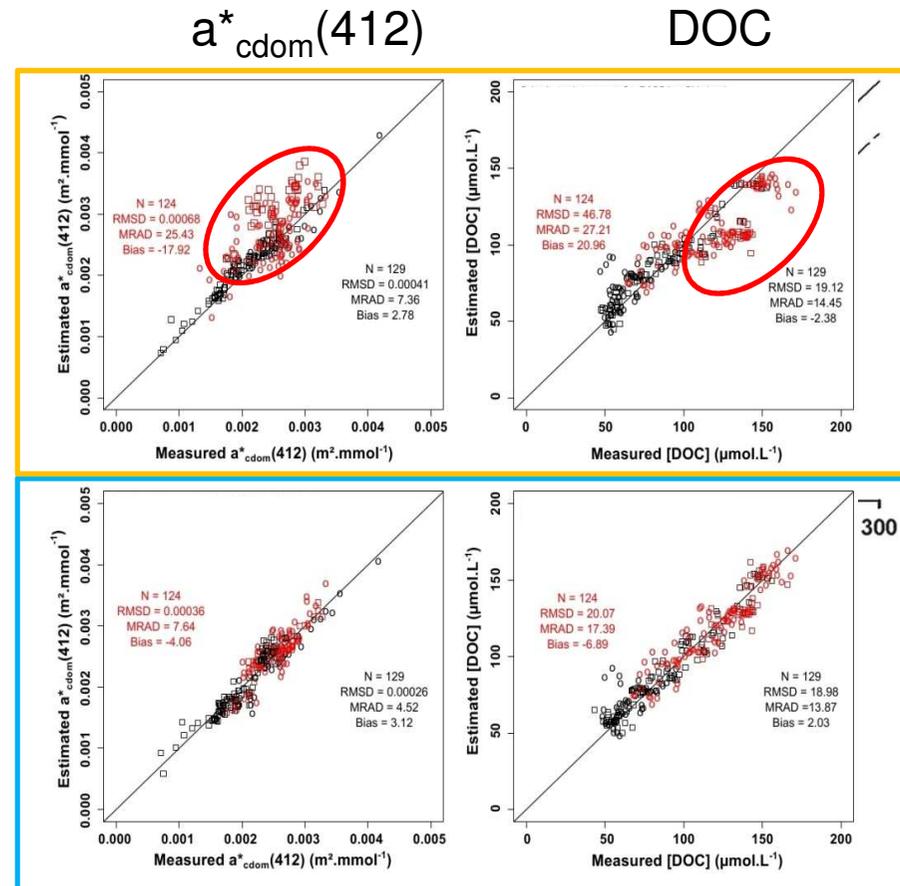


Algorithms have been developed to assess DOC from terrigenous origin



Fichot and Benner (2011, 2012)  
Vantrepotte et al. (2015)

L'utilisation de la pente du CDOM entre 320 et 412 nm permet de tracer l'origine marine de la DOM, et d'affiner l'estimation du DOC en prenant en compte la contribution marine.



Terrigenous hypothesis  
Vantrepotte et al., (2015)

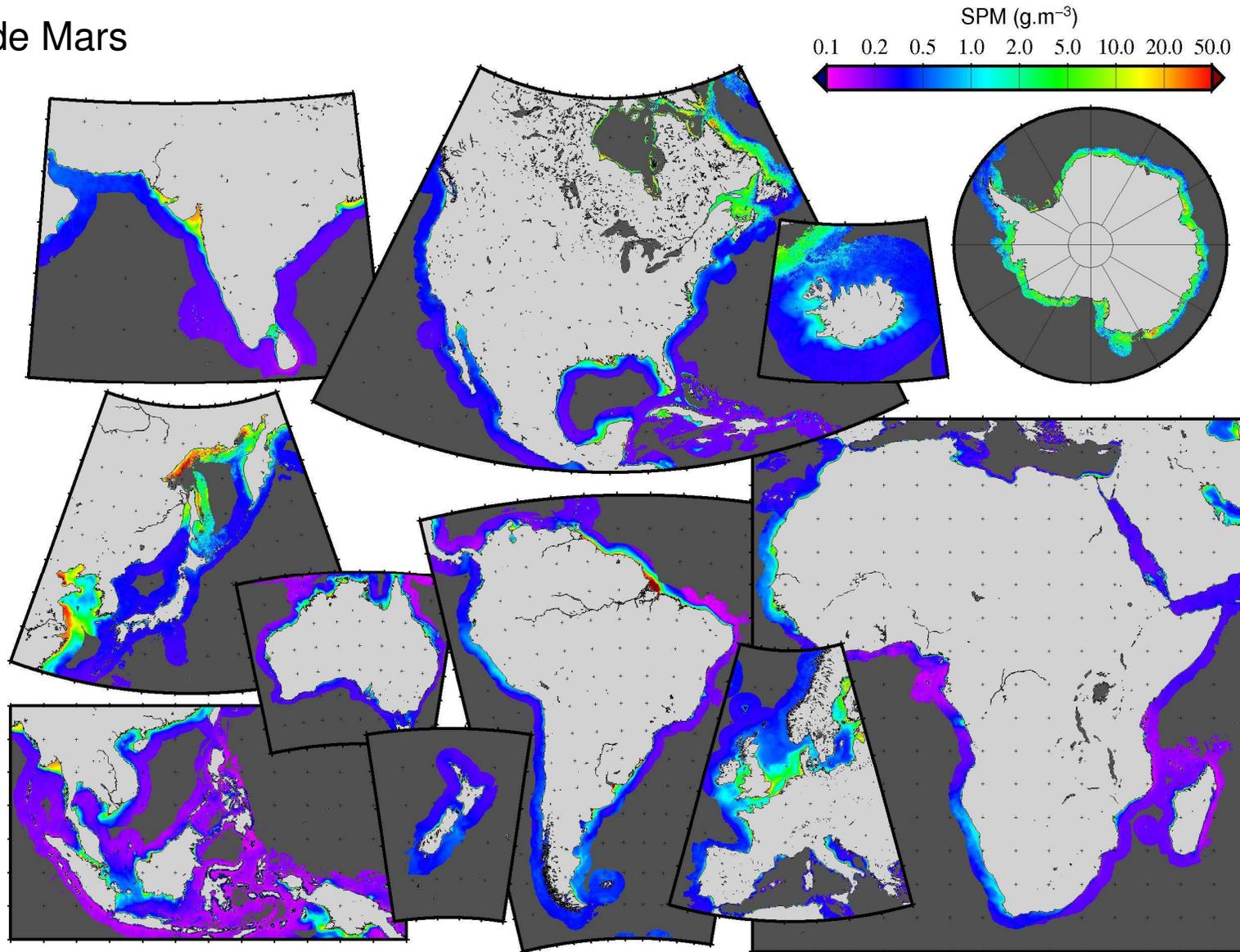
Mixed sources  
Dnahiez et al. 2017

$$a^*_{cdom}(412) = a^*_{cdom}(412)_{sst} - 0.00112 \cdot \frac{a_{cdom}(320)}{a_{cdom}(412)} + 0.004283$$

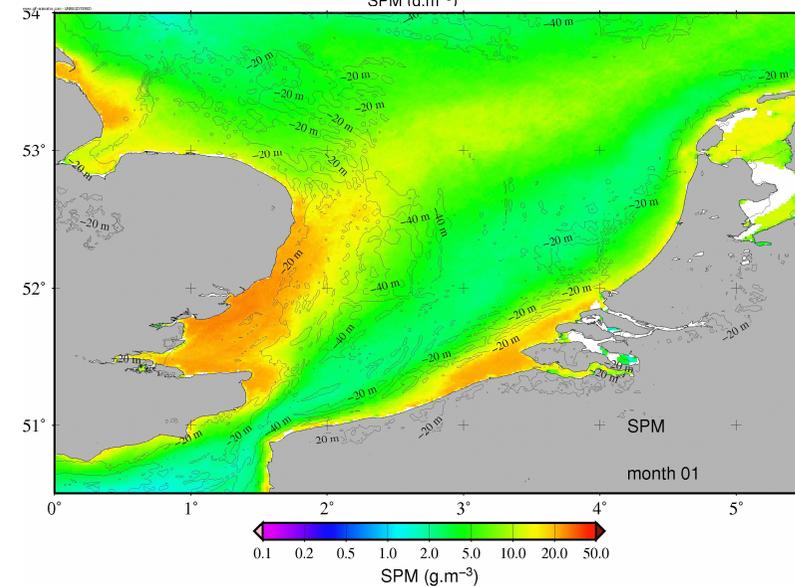
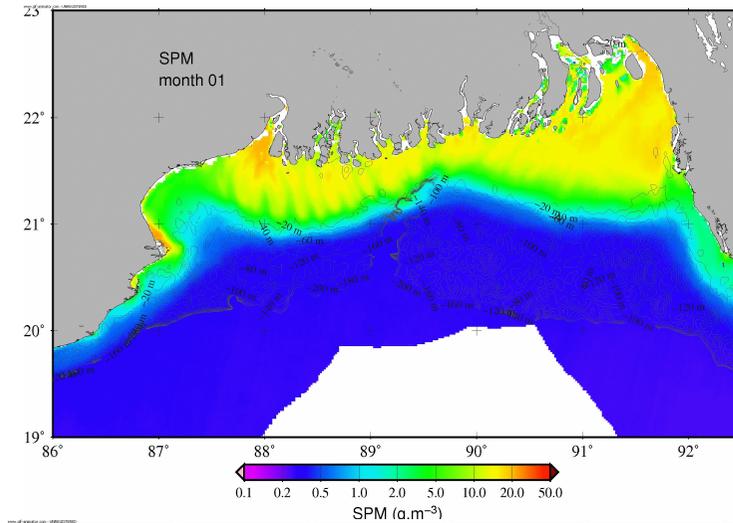
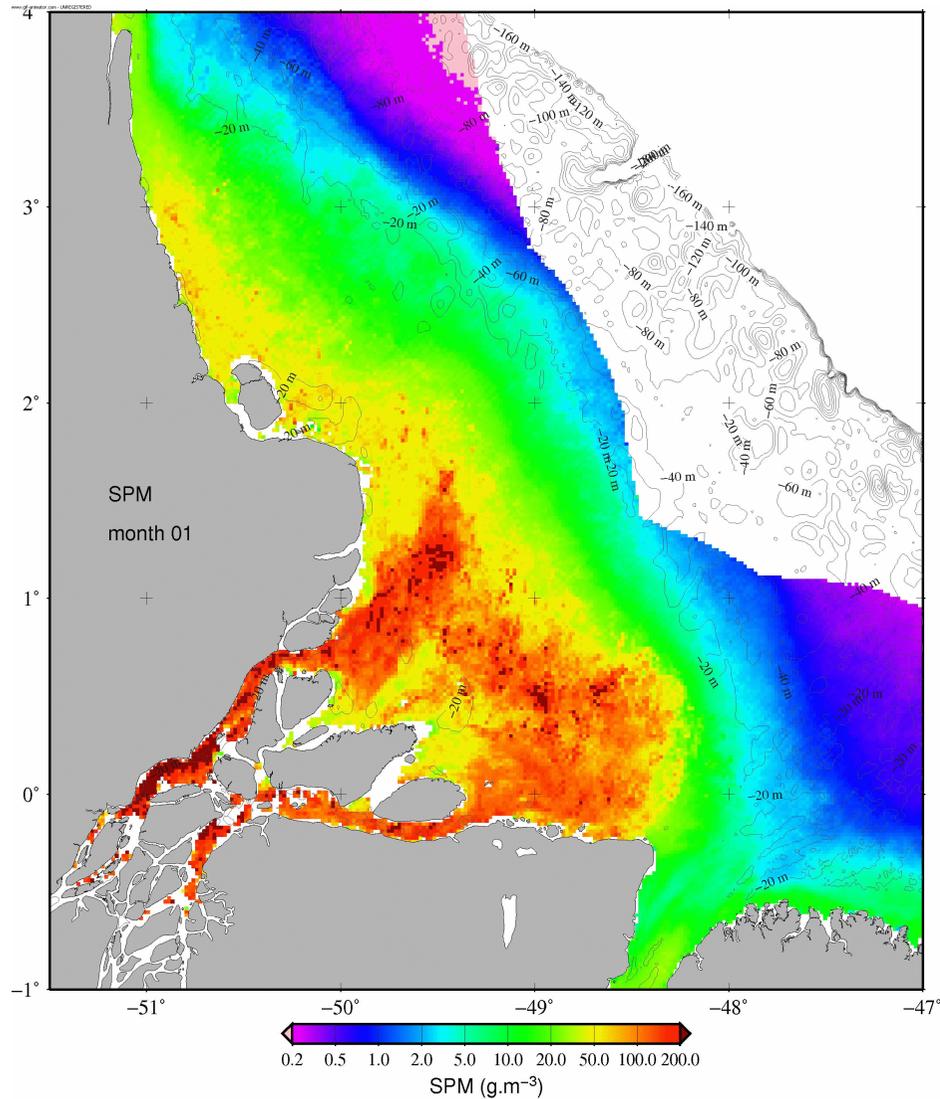
Danhiez et al. (2017) and Loisel et al., 2014 for  $a_{cdom}$

Une climatologie globale peut maintenant être générée à partir des 10 ans de données.

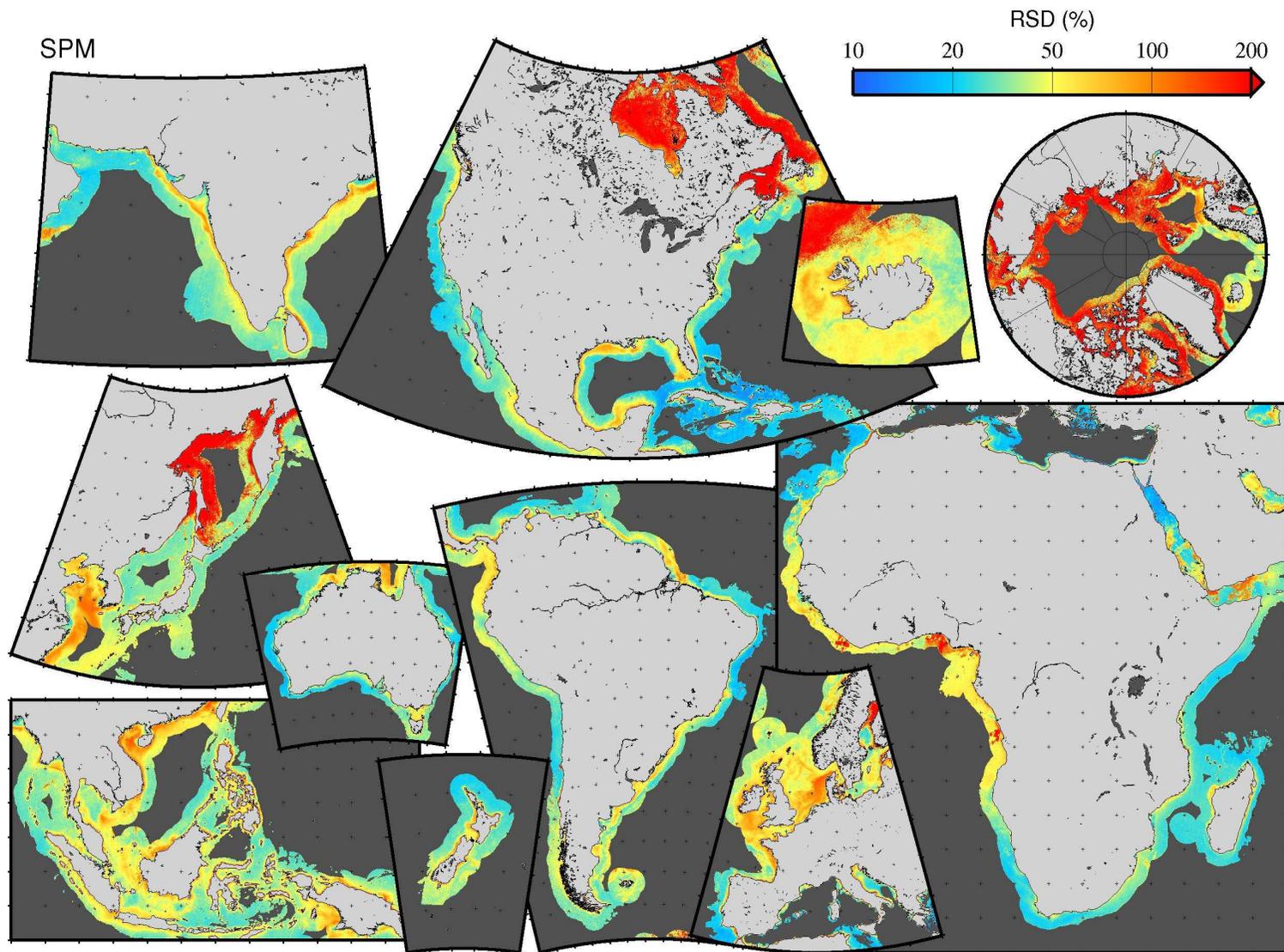
Mois de Mars



La description et l'analyse de la variation spatio-temporelle des paramètres estimés à l'échelle globale nécessitent des outils appropriés.



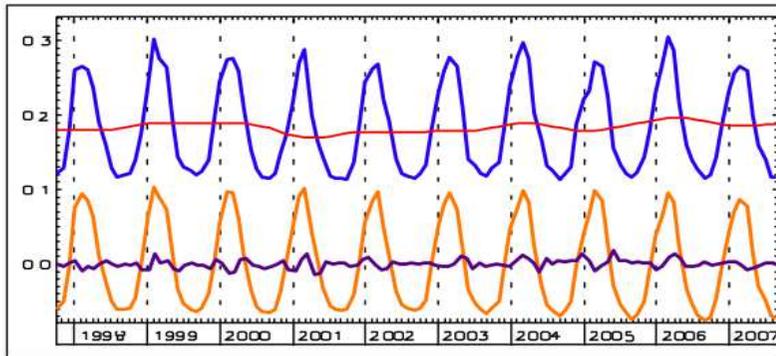
L'ampleur de la variation temporelle peut être rapidement observée à partir du coefficient de variation permettant d'identifier des zones très contrastées.



# Les séries temporelles sont décomposées par des outils statistiques appropriés.

## Census X-11: iterative bandpass filtering method

(Vantrepotte and Mélin, 2011; Vantrepotte et al., 2011, Pezzuli et al., 2005)



$$X(t) = S(t) + T(t) + I(t)$$

$X(t)$  original series

$T(t)$  Trend-cycle term

$S(t)$  Seasonal term

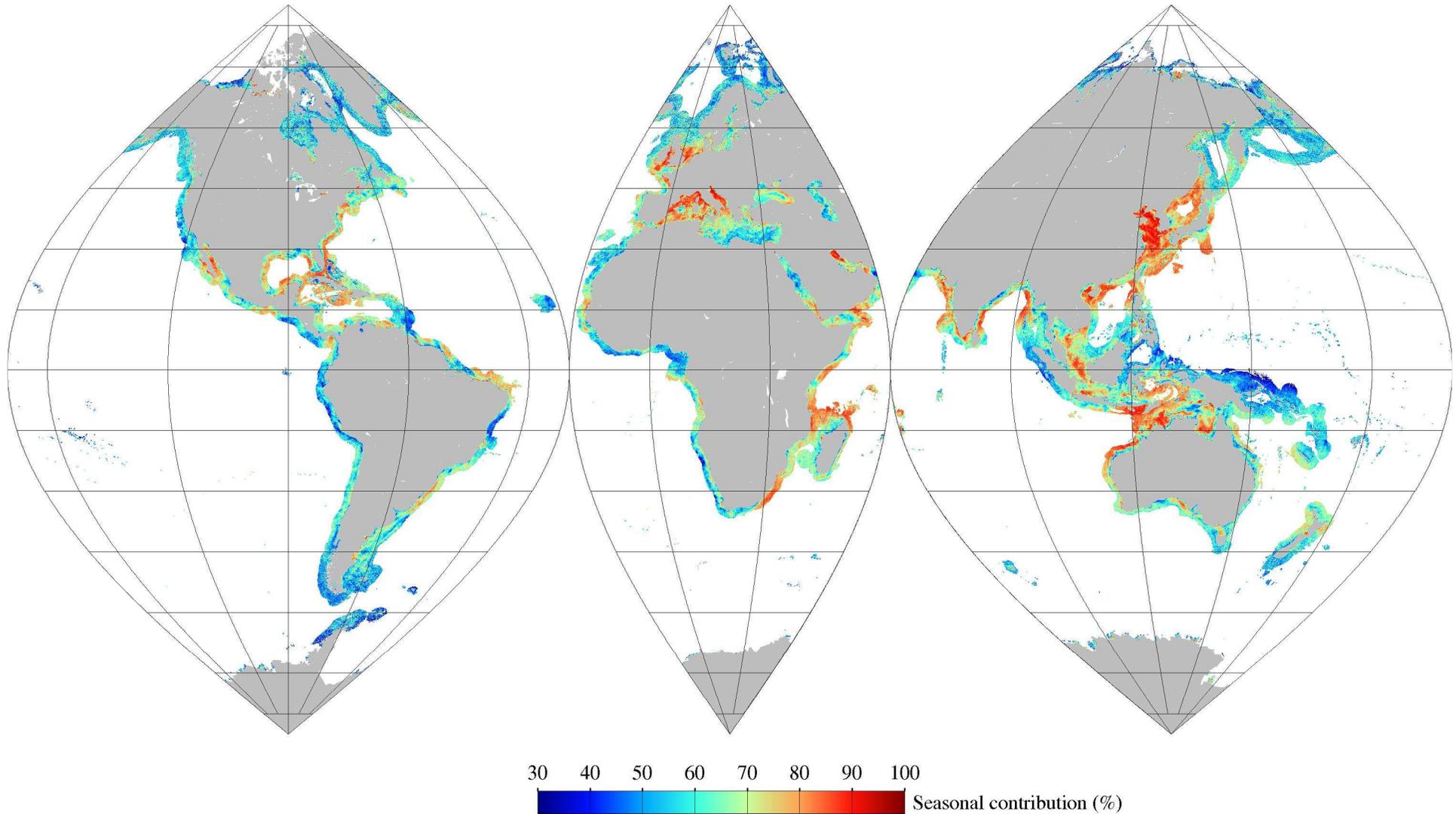
$I(t)$  Irregular term

X-11

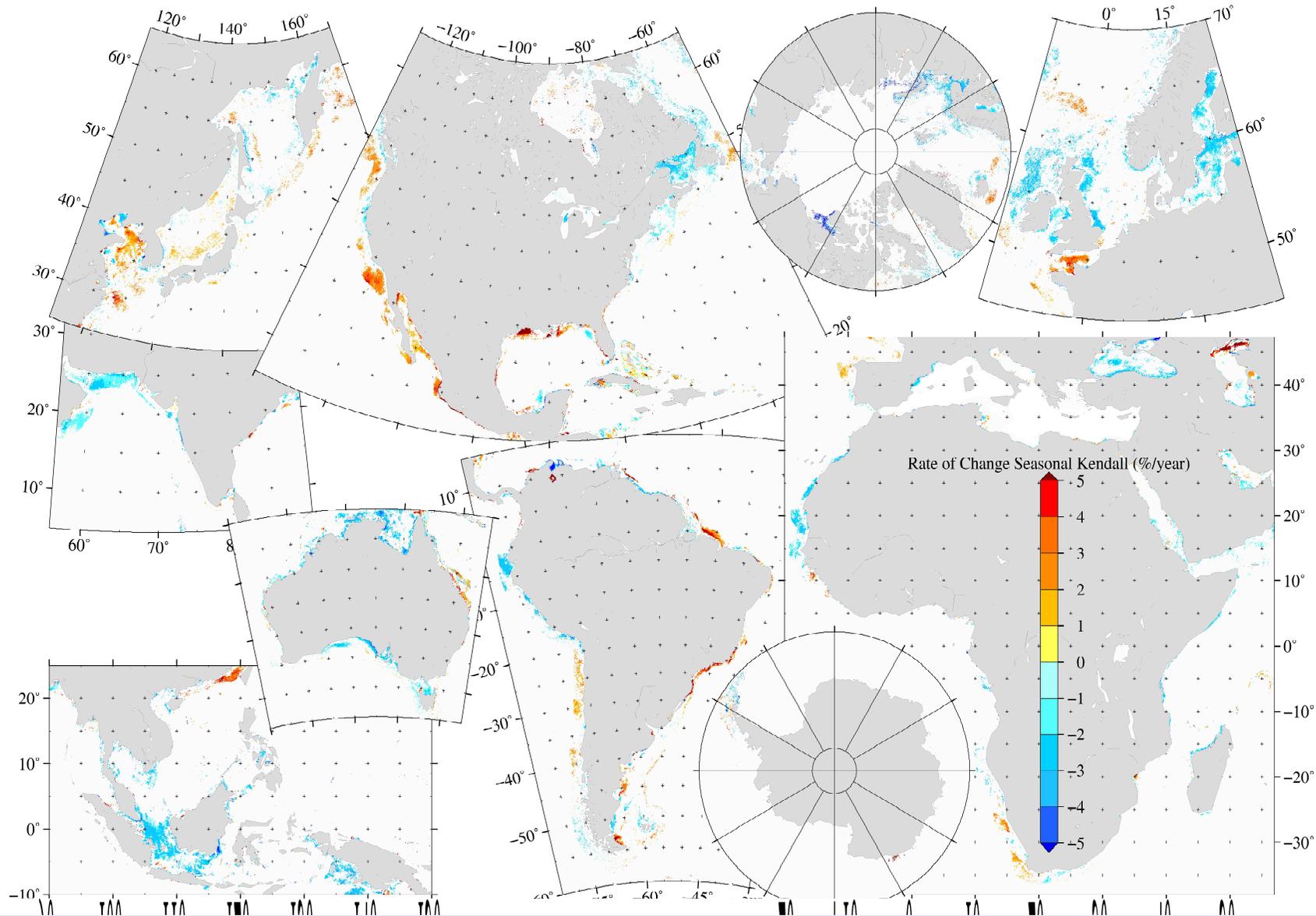
- Contribution de chaque terme à la variance totale du signal (%)
- $S(t)$  Stabilité du cycle saisonnier (pseudo-periodical)
- $T(t)$  Nature des tendances observées (et identification d'évènement non-linéaires exceptionnels)
- $I(t)$  Variations sub-annuelles

**Détection de tendance:** seasonal Kendal test and Ken's slope estimator (%/year)

# La variabilité temporelle de MES est principalement gouvernée par la composante saisonnière



# Identification de « Hot Spots » à l'échelle globale pour la MES



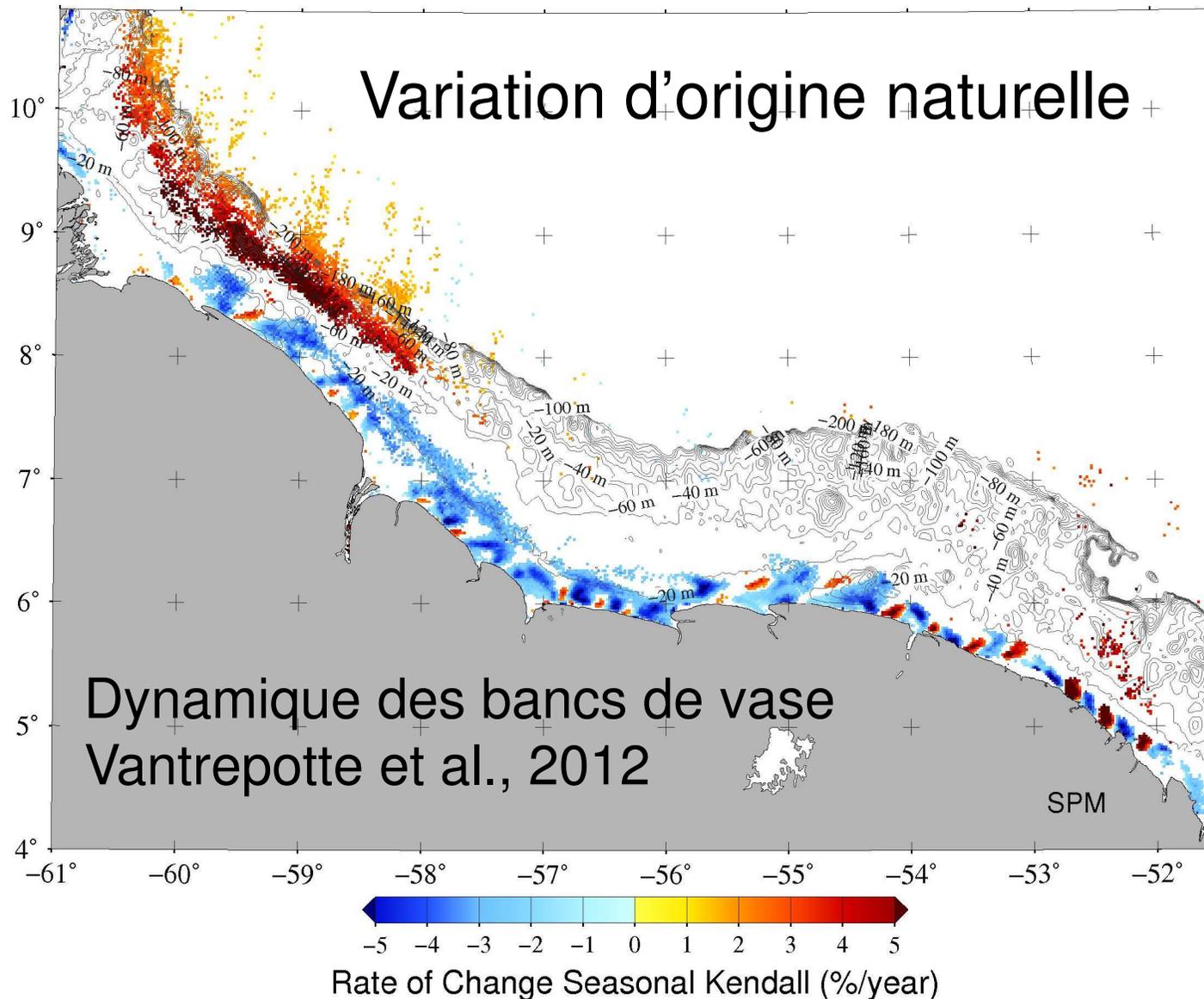
Evolution en %/an de la MES de 2002 à 2012

7% des zones côtières globales montrent une variabilité significative (à 0.01%) de MES. 70% d'entre elles présentent une décroissance de MES supérieure à 2%/an, et 24% une croissance de MES supérieure à 2%/an

tendance (en% par an)	Surface (in % of the coastal areas)
Sup à -4	10.5
-4/-3	18.4
-3/-2	32.0
-2/-1	11.6
-1/0	0.3
0/1	0.2
1/2	3.4
2/3	7.6
3/4	6.0
Sup à 4	11.0
	100

Les fortes augmentations (>5% par an) et diminutions de MES s'équilibrent.

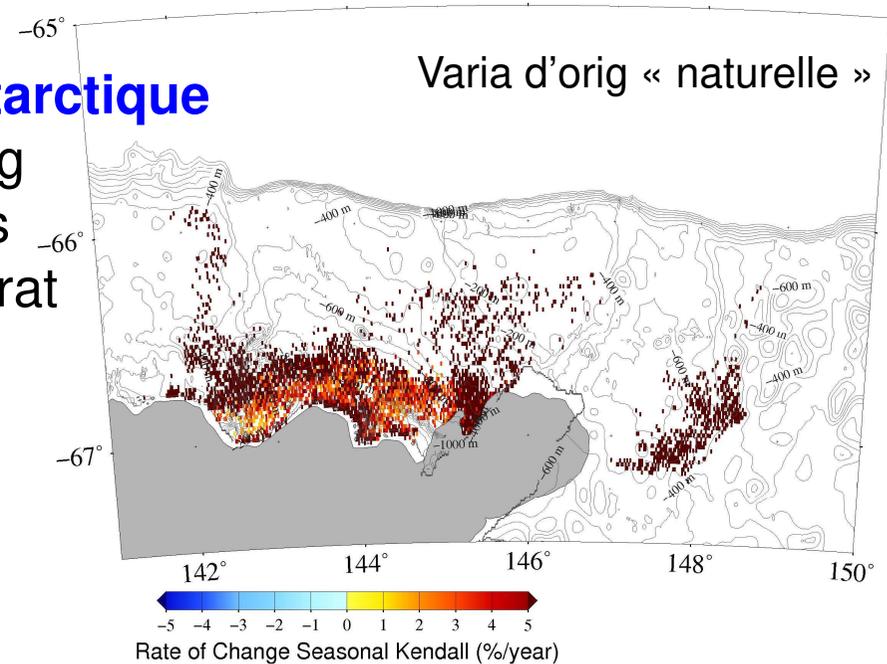
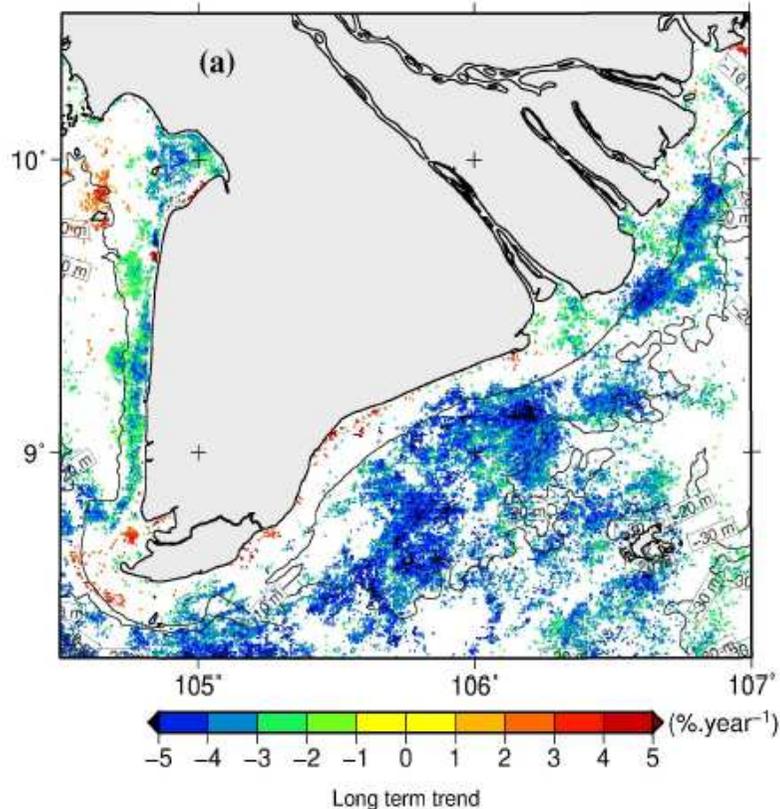
Le terme de tendance “à long terme” témoigne de processus géomorphologiques en certaines zones.



## Rapide augmentation de MES en Antarctique

(Victoria land) où la formation d'iceberg est observée, avec potentiellement plus d'eau douce, et plus d'érosion du substrat rocheux.

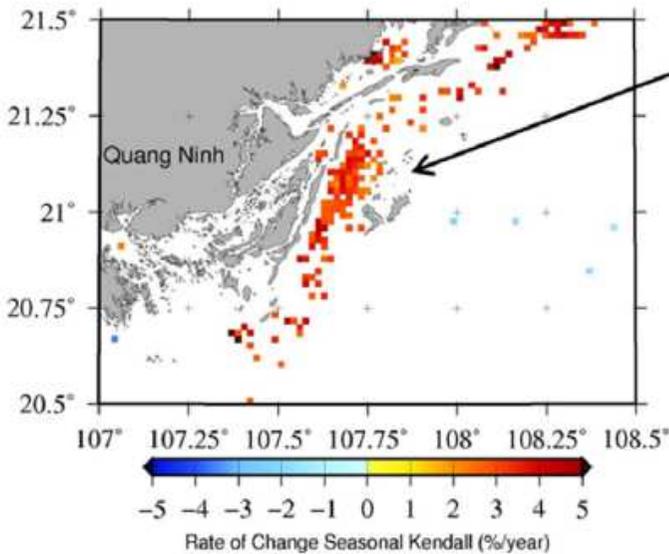
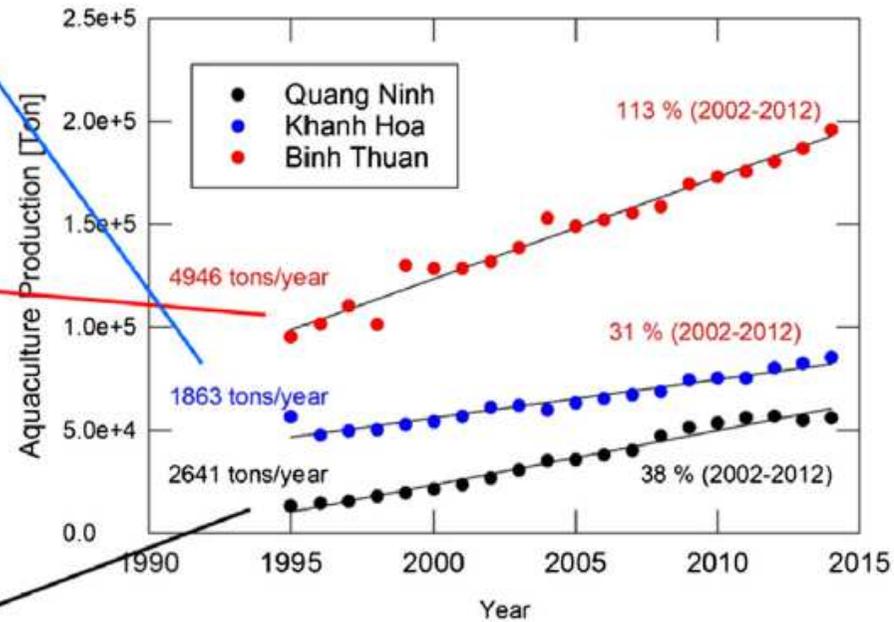
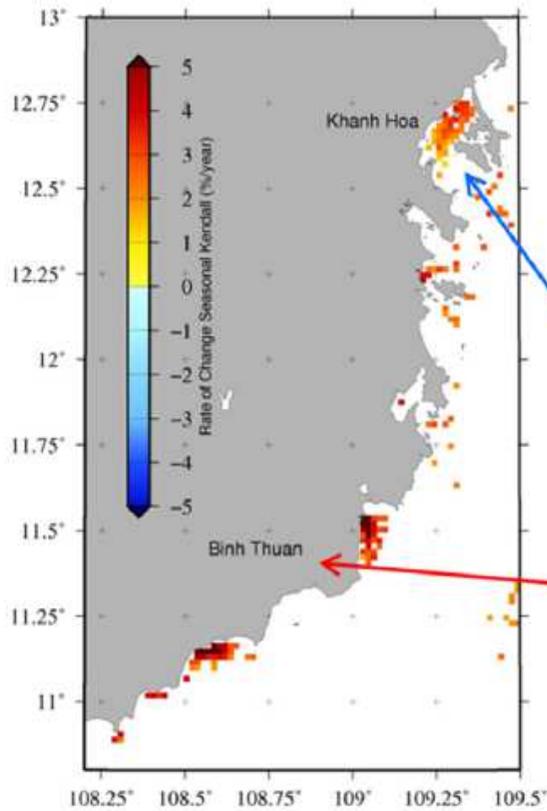
Varia d'orig humaine



**Rapide décroissance de MES au niveau du prodelta** due aux activités humaines (barrages, extraction de sable, etc) dans le Mekong

Loisel et al., 2014

# Impact de l'aquaculture sur Chla (aucune tendance sur MES)

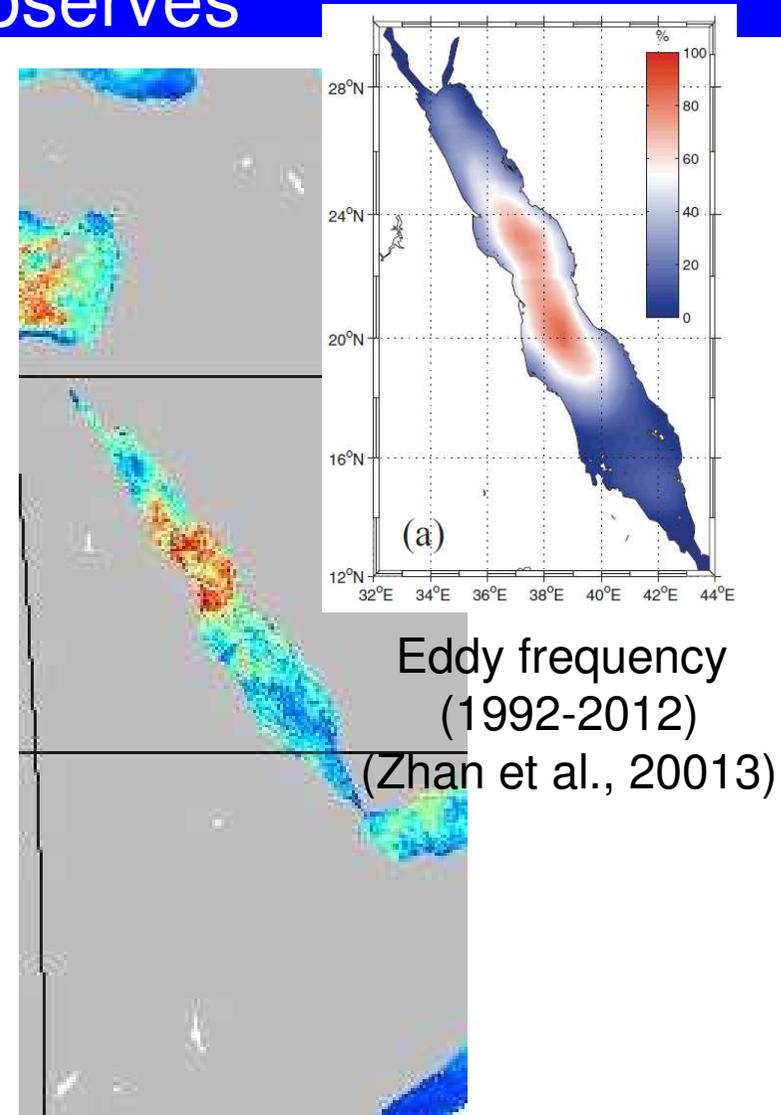
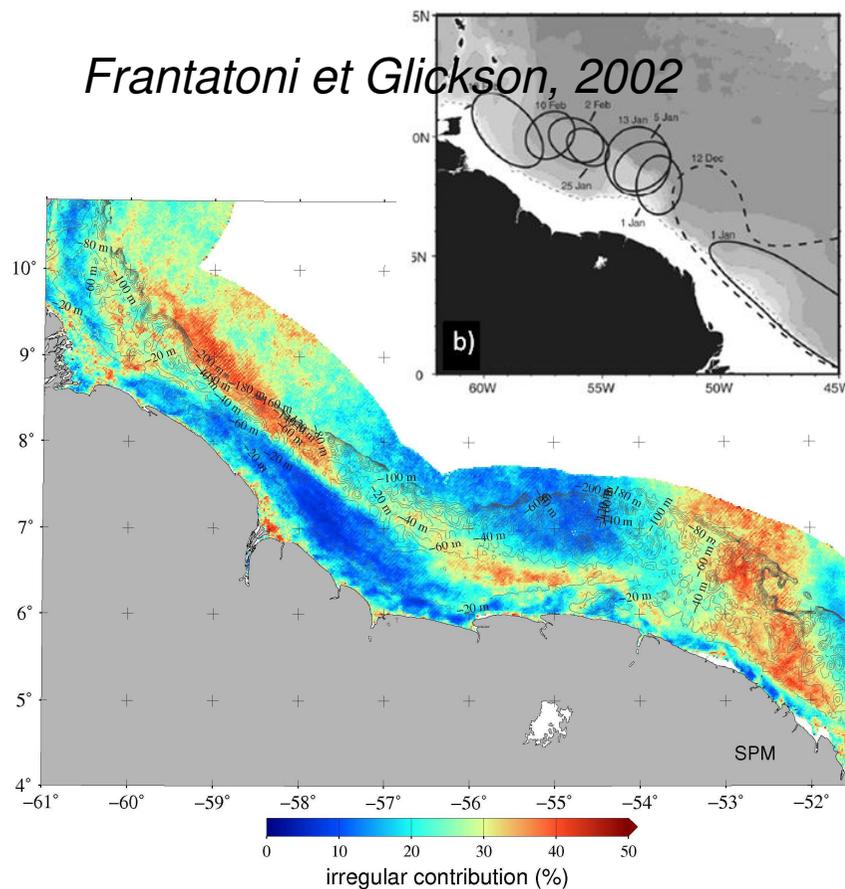


Chla et la production aquacole montrent des évolutions parallèles sur la même période de temps:

- Chla augmente de 50% à Binh Thuan
- Chla augmente de 20% à Khanh Hoa.

Des mesures in situ de nutriments sont nécessaires pour confirmer ce lien.

# Le terme irrégulier apporte des informations sur l'impact des processus à sub(méso)-échelles sur la distribution des paramètres observés

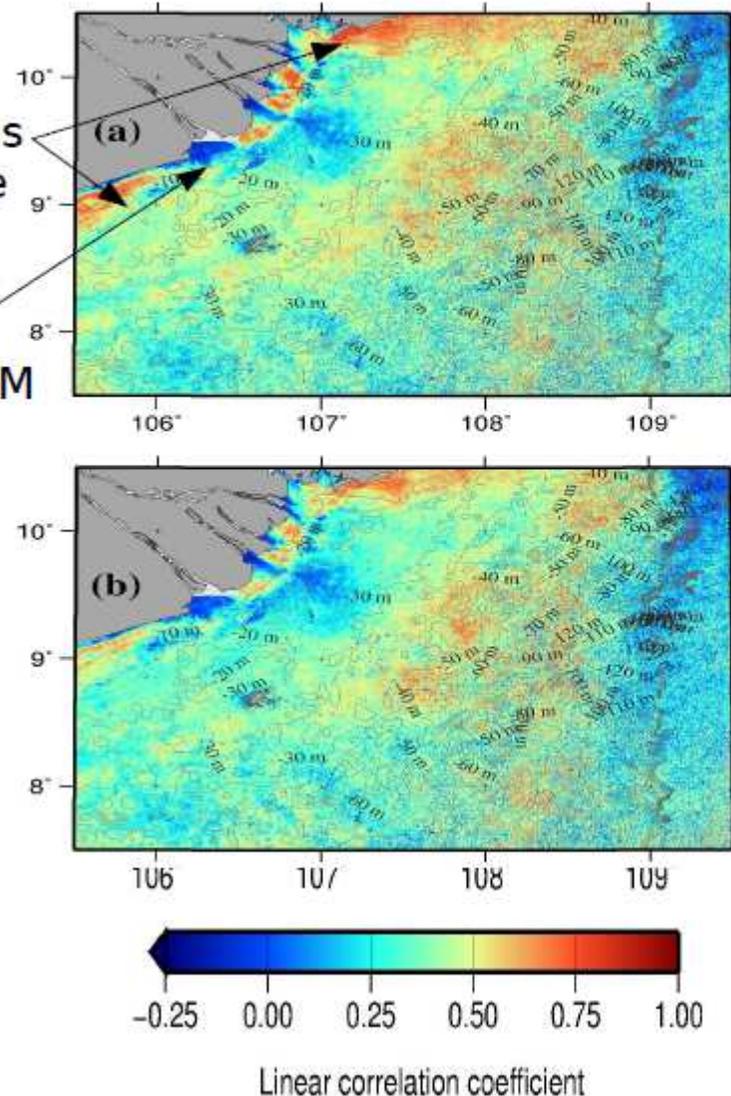


# Le couplage des données OCR et des données de forçage apportent des informations précieuses sur les couplages: Zoom sur la région du delta du Mekong

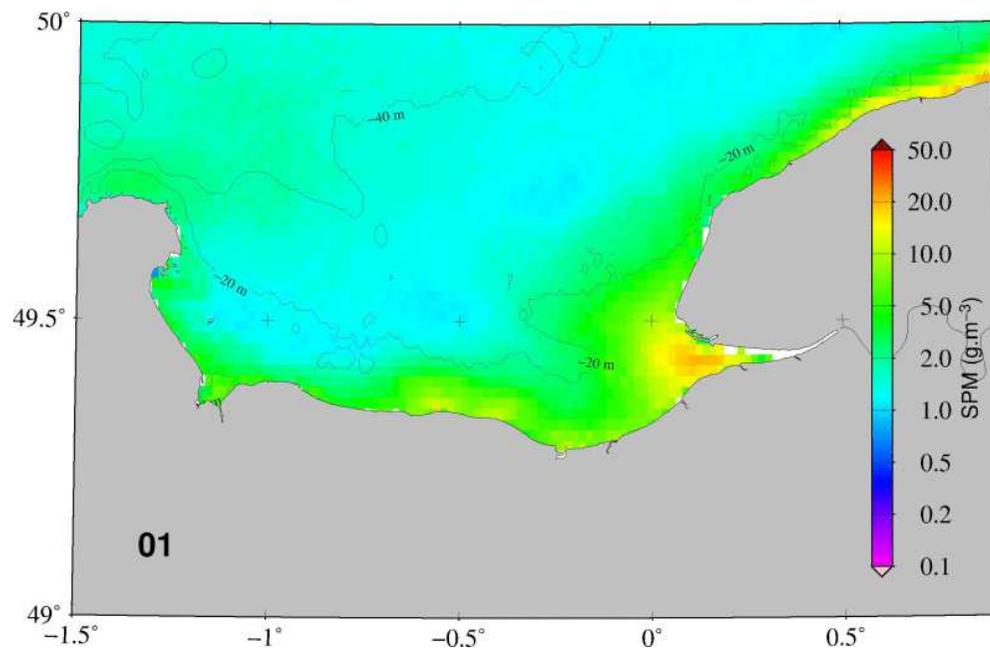
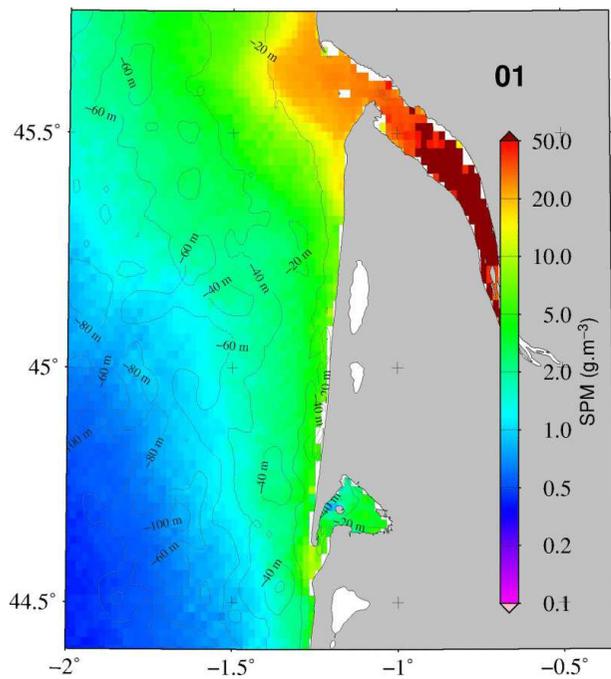
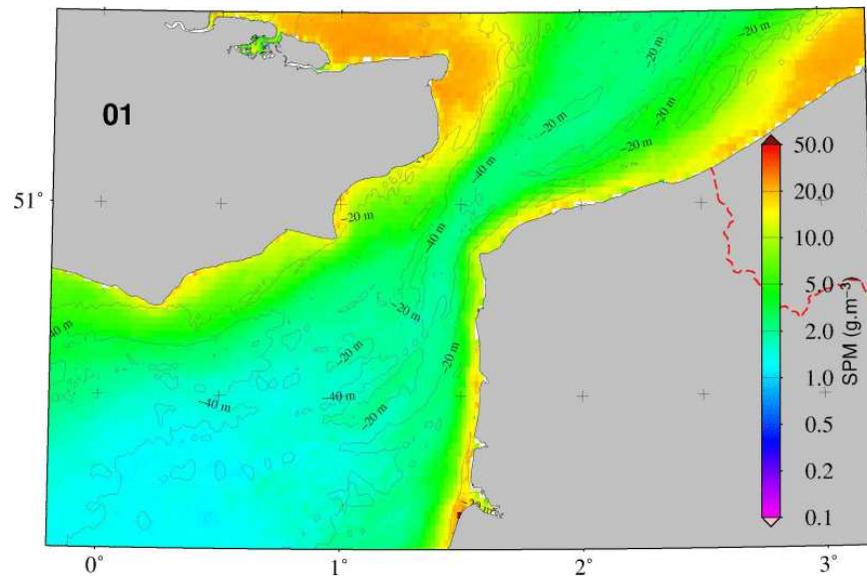
**High  $r$**  : erosion/resuspension areas where waves and swell control the SPM variability

**Low  $r$**  : reflect the regulation of SPM loads by river discharge

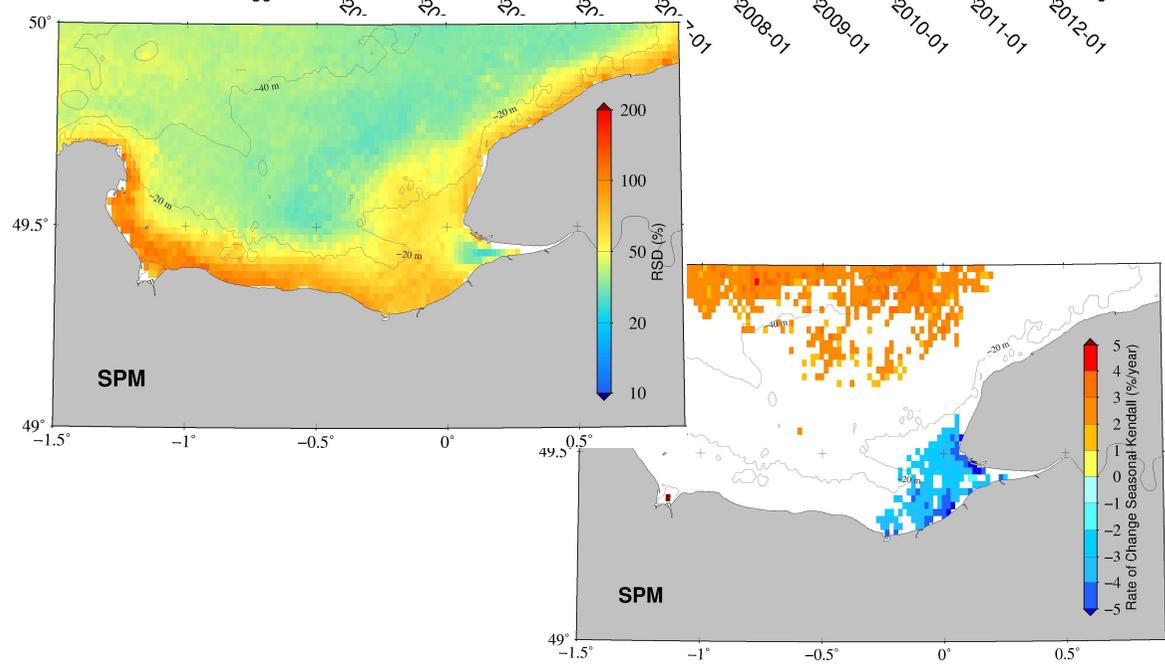
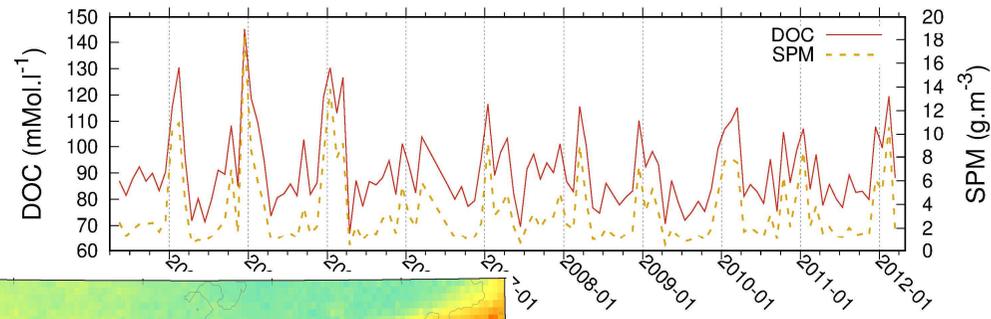
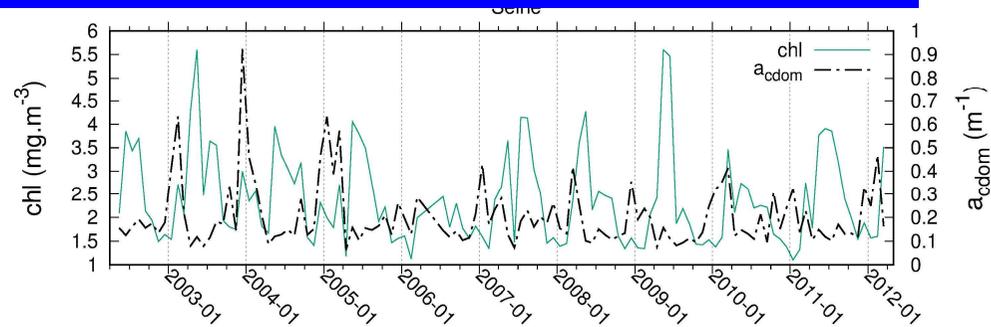
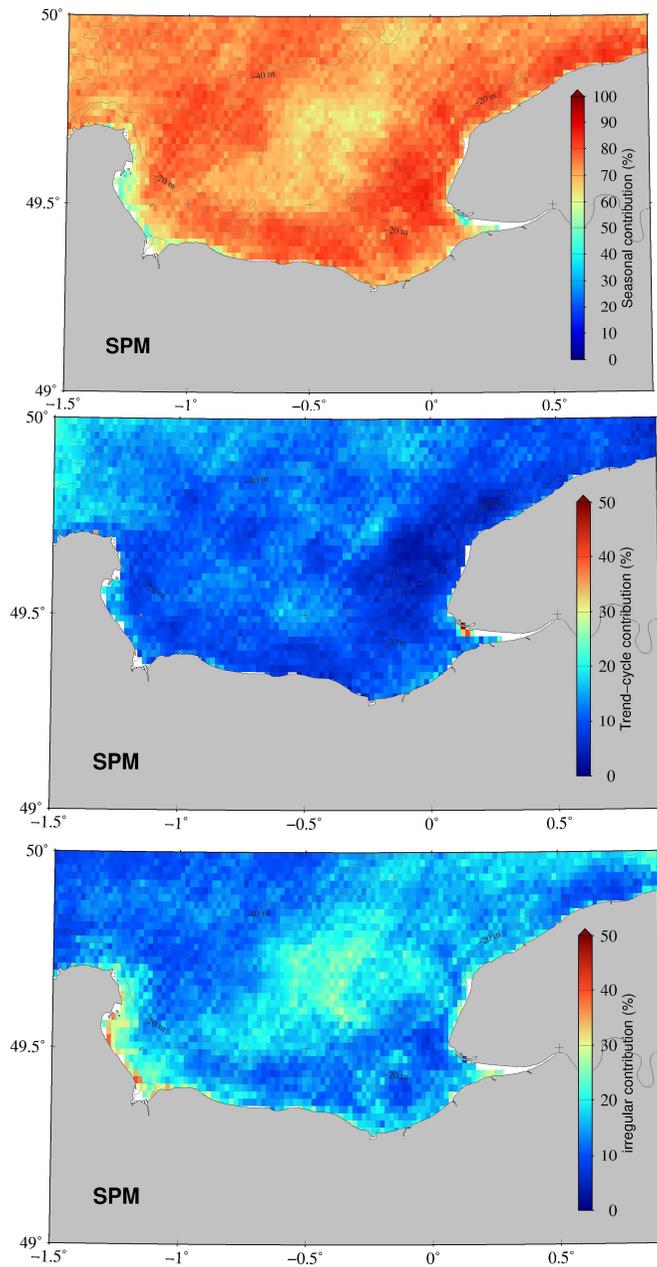
Results in agreement with the deposition and erosion areas identified by Hein et al. (2013) from a prognostic model.

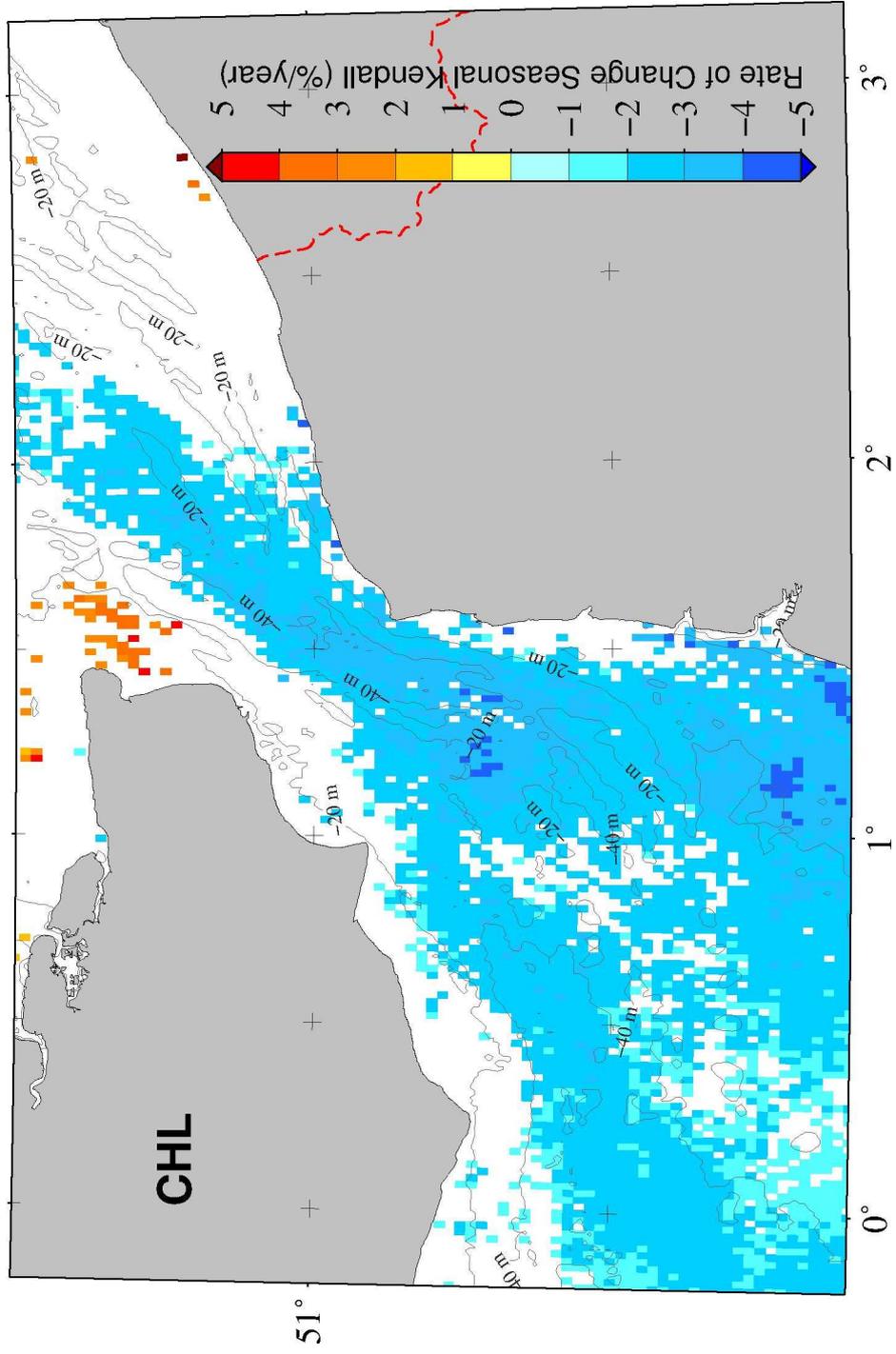


Climatologie de Chl, SPM,  
DOC, et IOPs disponibles  
sur les zones SOMLIT  
(2002-2012)



# Contribution X-11, coeff var, tendance, et séries temporelles pour la Seine





Le suivi de paramètres bio-optiques estimés à partir d'observations spatiales, combiné avec les paramètres de forçage physique, et intégrés dans une métrique appropriée, apportent des informations pertinentes sur l'évolution des zones côtières ainsi que sur les processus de couplage.

Il est temps de coupler les réseaux de mesures In situ aux observations spatiales (le contexte n'a jamais été aussi favorable)

SOMLIT idéal pour ça (faire évoluer le réseau, mise en place d'une plateforme Intégratrice)



Données disponibles:  
<http://sextant.ifremer.fr>

**Cảm ơn bạn đã quan tâm !  
Merci de votre attention  
Thanks for your attention**



**Merci au programme  
TOSCA du CNES et à  
l'ANR (GLOBCoast)**