

Défense de thèse de doctorat Sorbonne Université
ED 129 – Sciences et Environnement

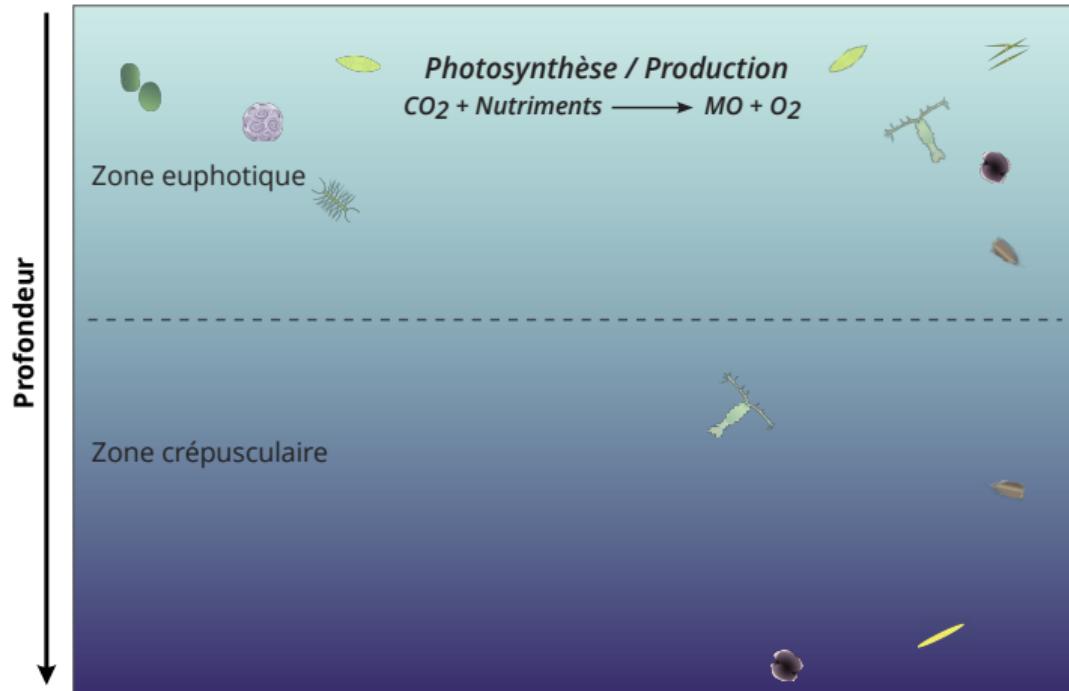
IMPACT DES FRONTS SUR LE PHYTOPLANCTON DANS LA RÉGION DU GULF STREAM QUANTIFIÉ PAR IMAGERIE SATELLITAIRE

par Clément Haëck

dirigée par Marina Lévy et Laurent Bopp

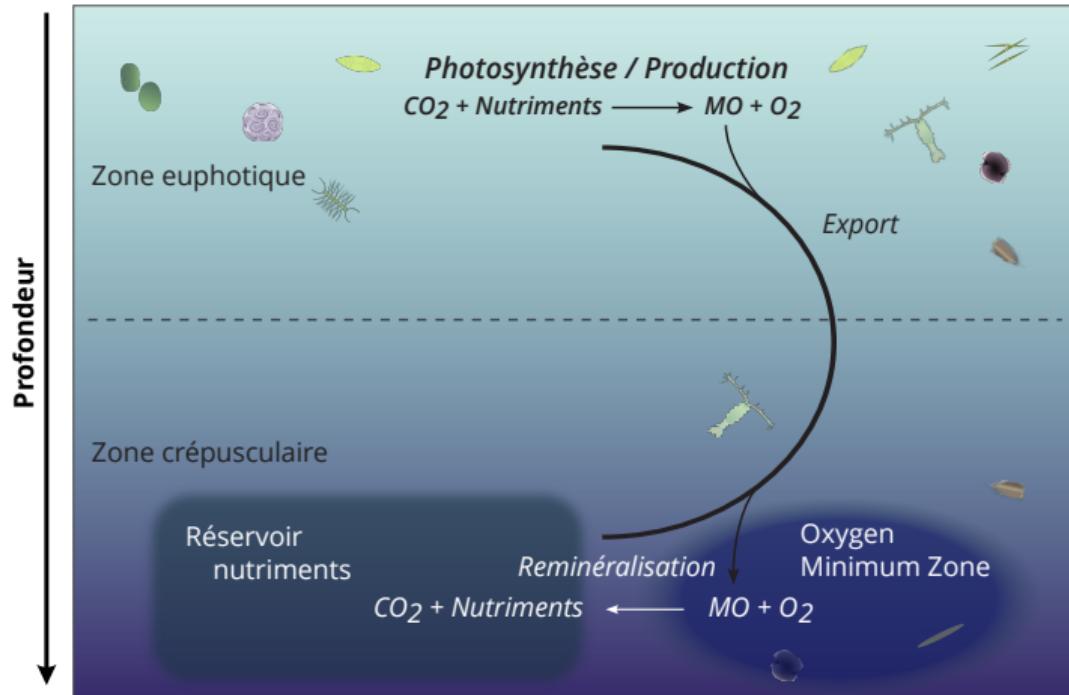
au Laboratoire d'Océanographie et du Climat
Expérimentations et Analyses Numériques

Le phytoplancton dans le système terre

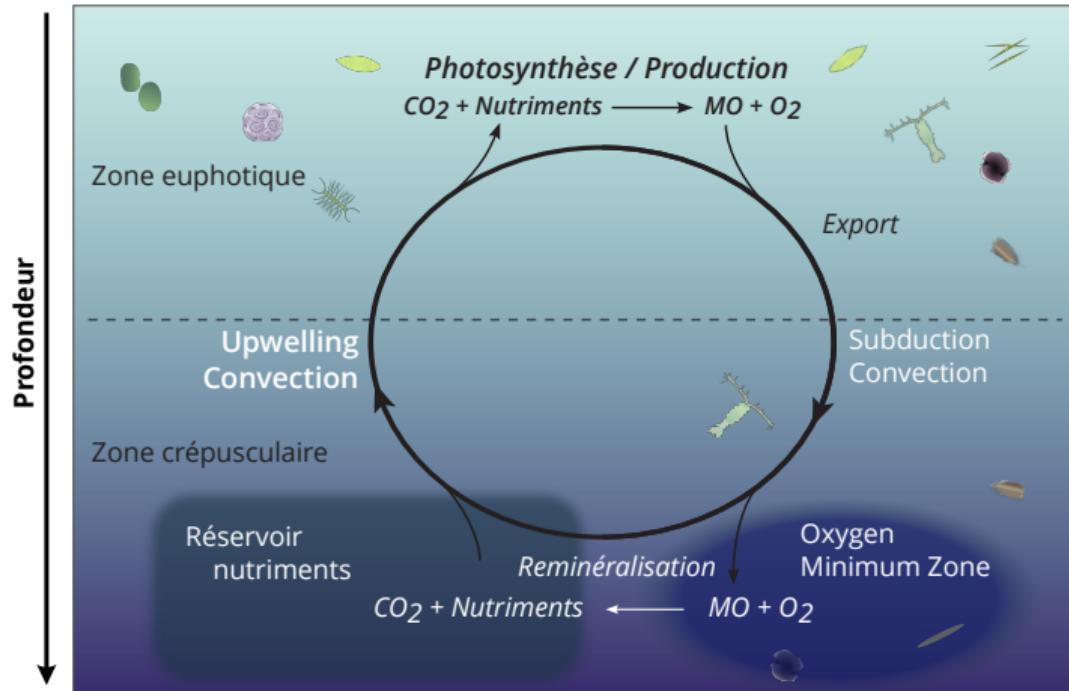


adapté de Lévy et al. 2023

Le phytoplancton dans le système terre

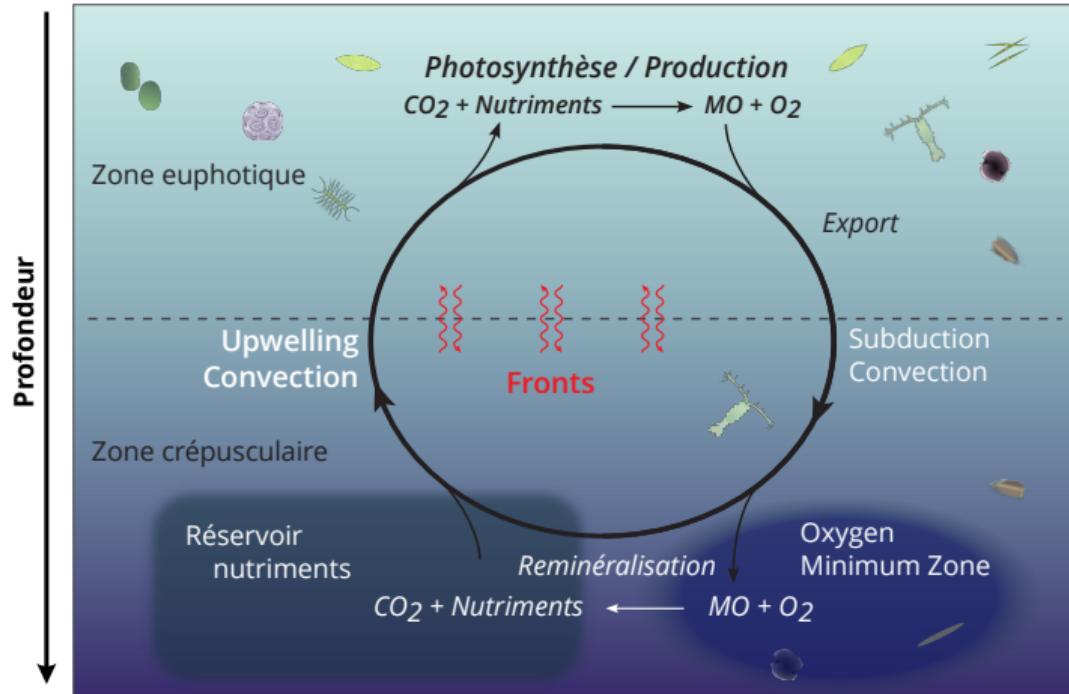


Le phytoplancton dans le système terre



adapté de Lévy et al. 2023

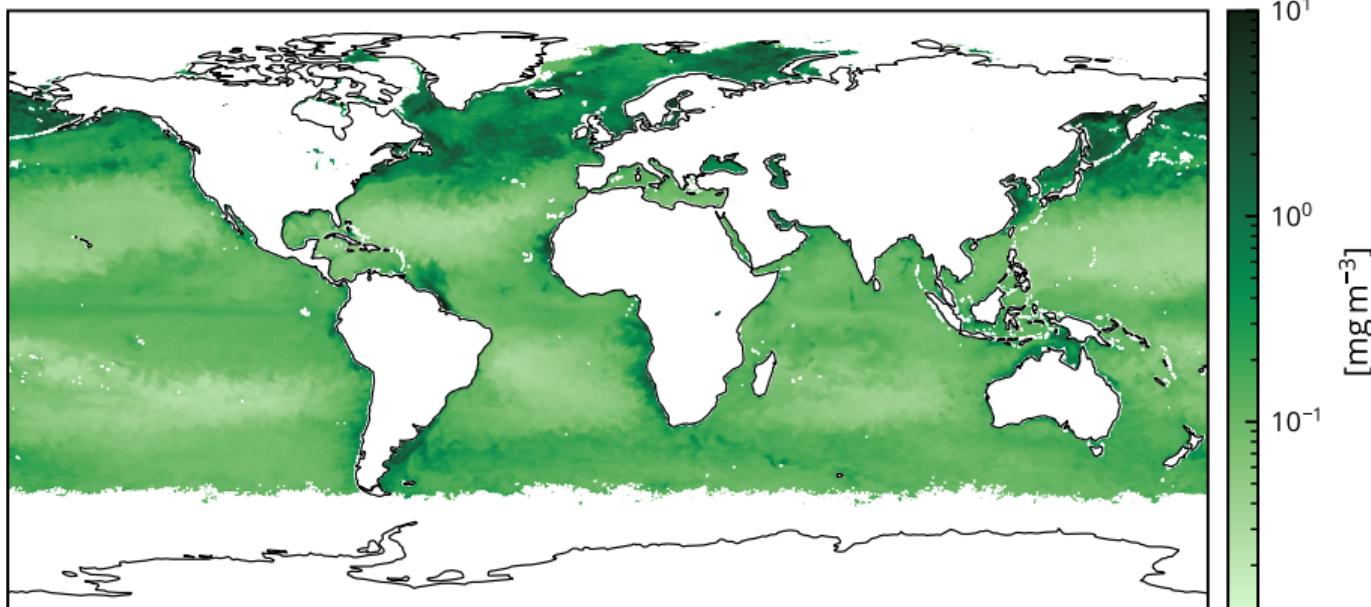
Le phytoplancton dans le système terre



adapté de Lévy et al. 2023

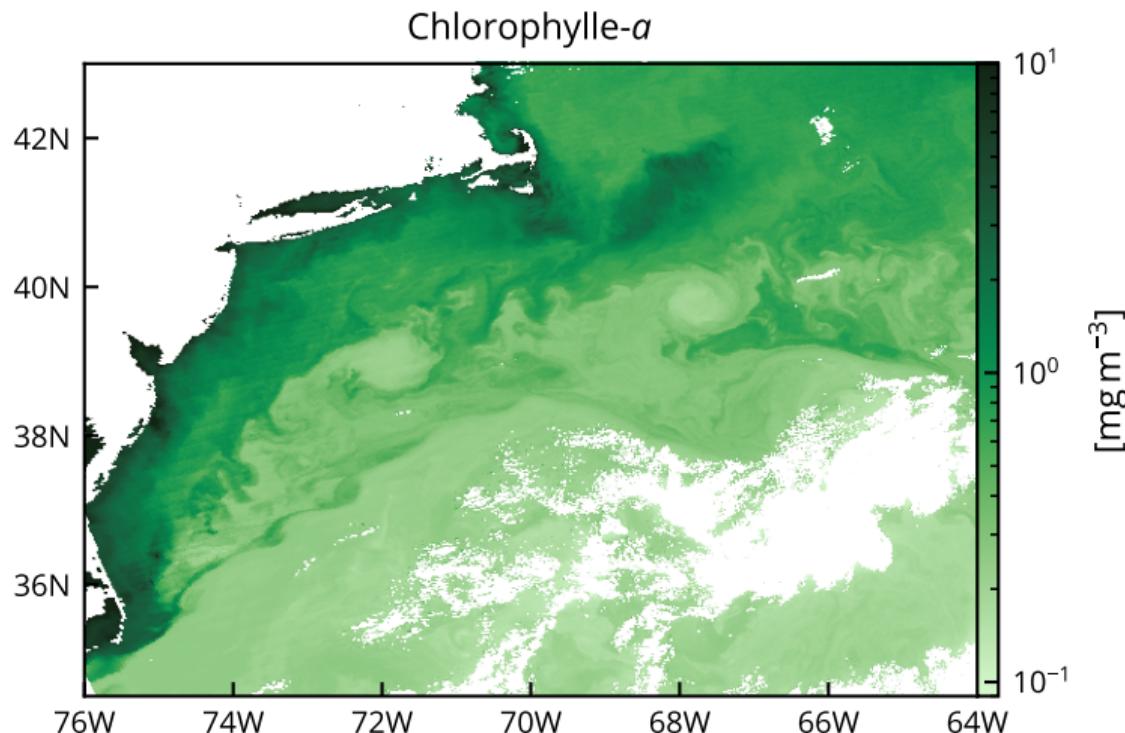
Variabilité du phytoplancton : grande échelle

Chlorophylle-a



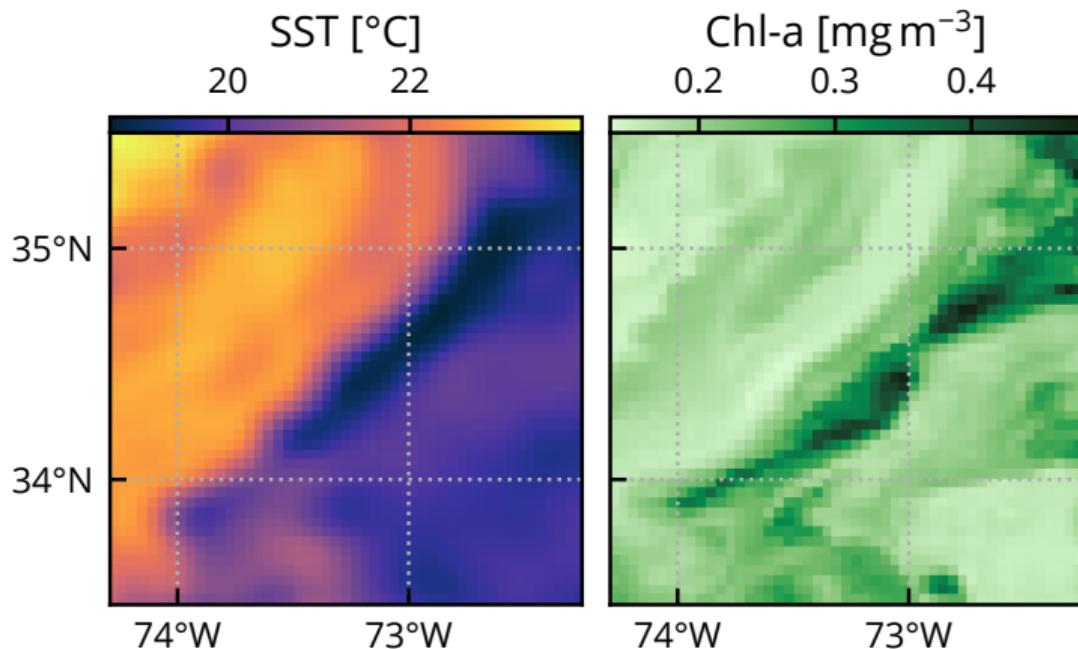
moyenne sur mai 2023, Globcolour-Copernicus

Variabilité du phytoplancton : (sub)mésoéchelle



L2 MODIS-Terra, 23 février 2020

Variabilité du phyplancton : front de sub-mésoéchelle

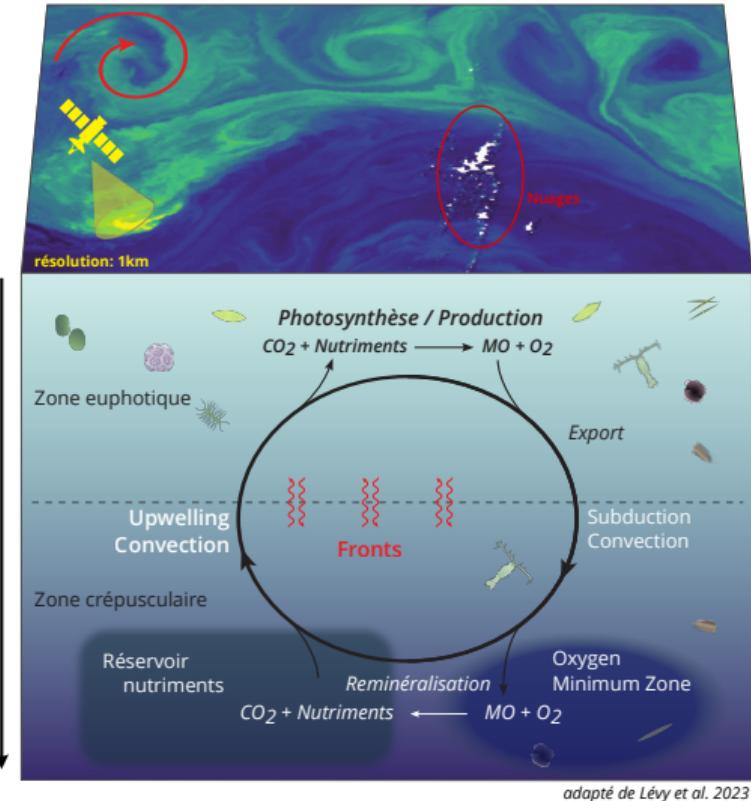


22 avril 2007, $\approx 150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$

PROBLÉMATIQUE

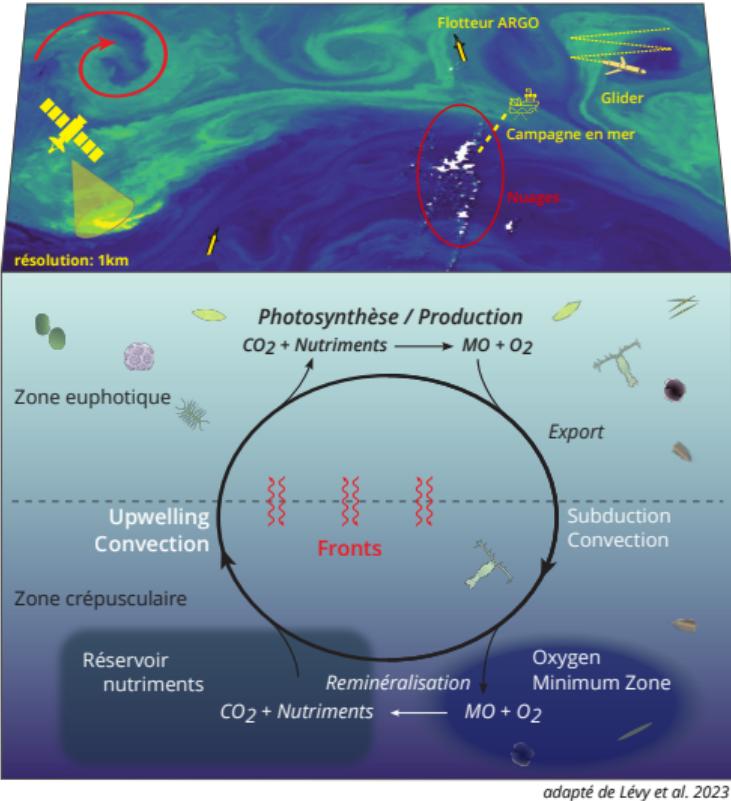
Quantifier la réponse de la chlorophylle-*a* aux dynamiques de fines échelles ($\mathcal{O}(10\text{--}30 \text{ km})$), dans un contexte grande échelle (*ie* biorégions).

Approche : synopticité de l'imagerie satellitaire



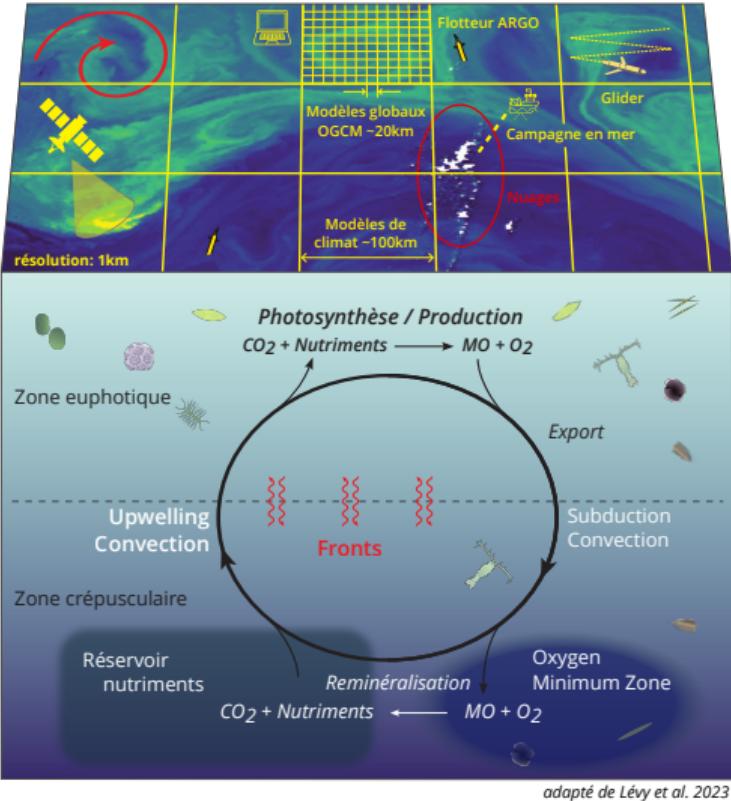
- ▶ satellite :
 - + résolution 1km, journalière
 - + **synoptique**
 - en surface
- ▶ in-situ :
 - "ponctuelles"
 - + résolution en profondeur
- ▶ Modèles numériques biogéochimiques
 - résolution limitée en global

Approche : synopticité de l'imagerie satellitaire



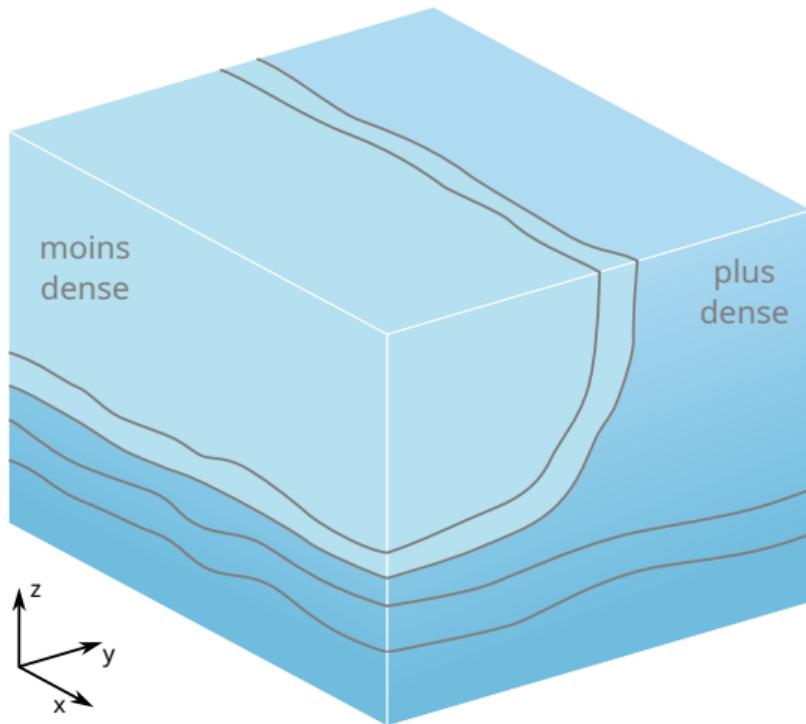
- ▶ satellite :
 - + résolution 1km, journalière
 - + **synoptique**
 - en surface
- ▶ in-situ :
 - "ponctuelles"
 - + résolution en profondeur
- ▶ Modèles numériques biogéochimiques
 - résolution limitée en global

Approche : synopticité de l'imagerie satellitaire

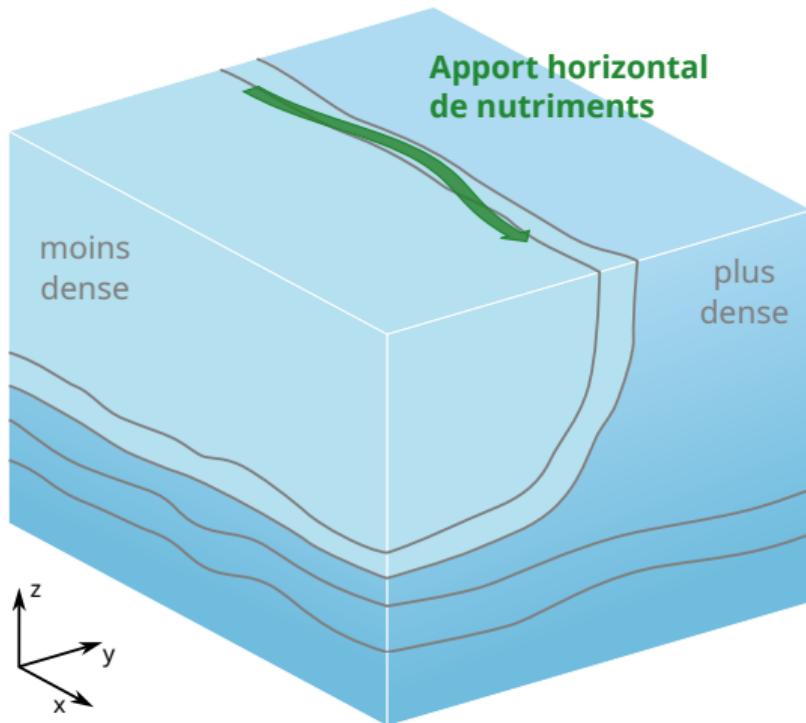


- ▶ satellite :
 - + résolution 1km, journalière
 - + **synoptique**
 - en surface
- ▶ in-situ :
 - "ponctuelles"
 - + résolution en profondeur
- ▶ Modèles numériques biogéochimiques
 - résolution limitée en global

Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



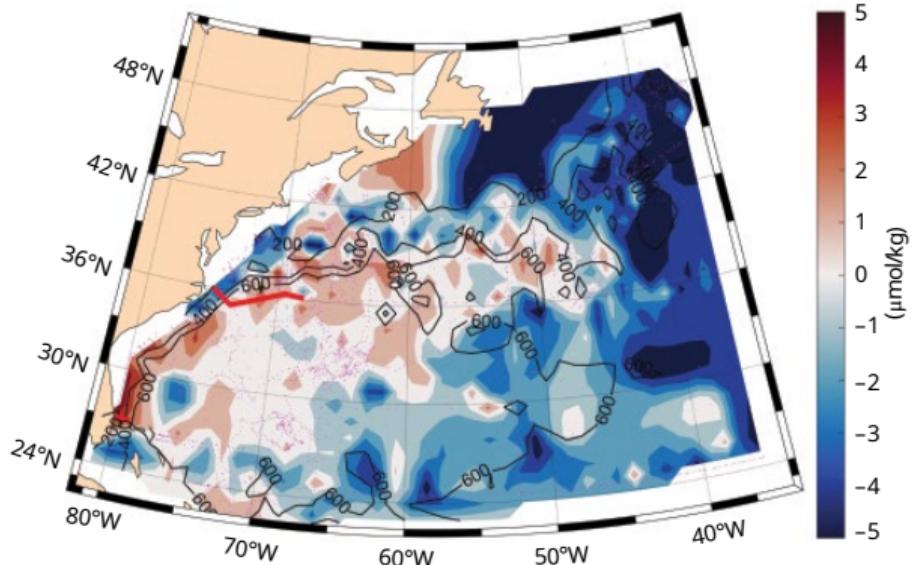
Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



Gulf Stream : un exemple de 'nutrient stream'

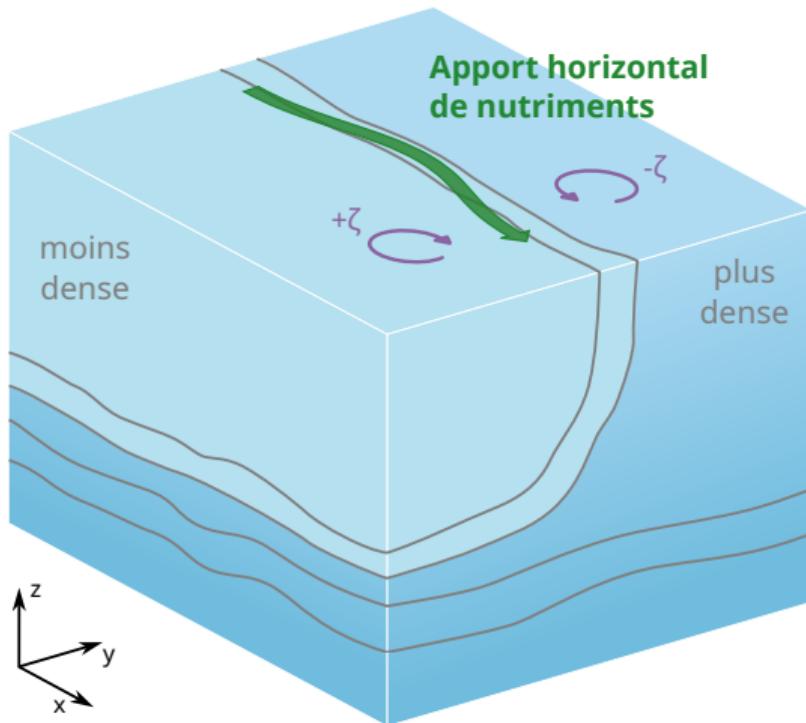
- ▶ Apport de nutriments à grande échelle par le Gulf Stream

Anomalie de NO_3^- sur l'isopycne $\sigma=27 \text{ kg/m}^3$ (WOC 2013 + Argo)

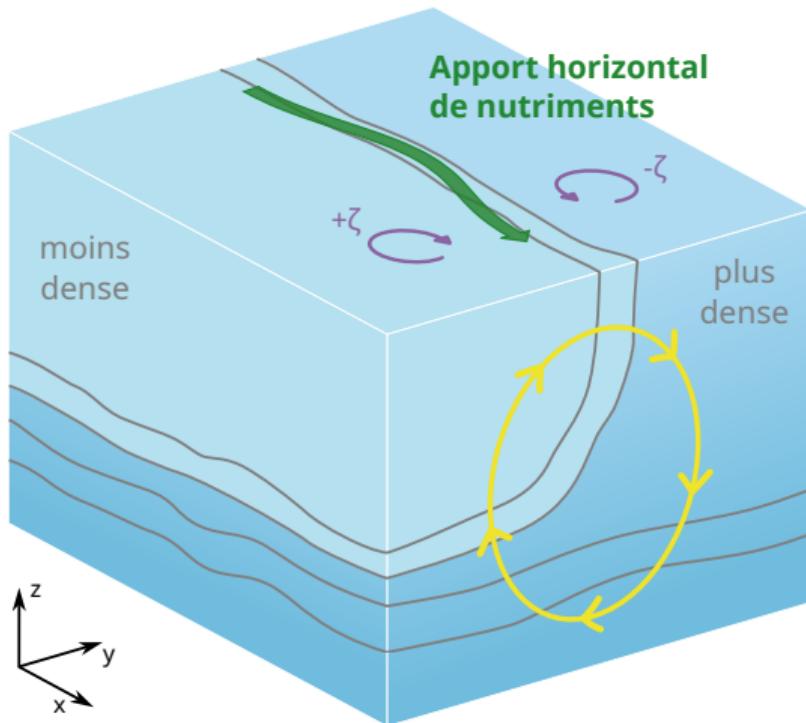


Whitt 2019

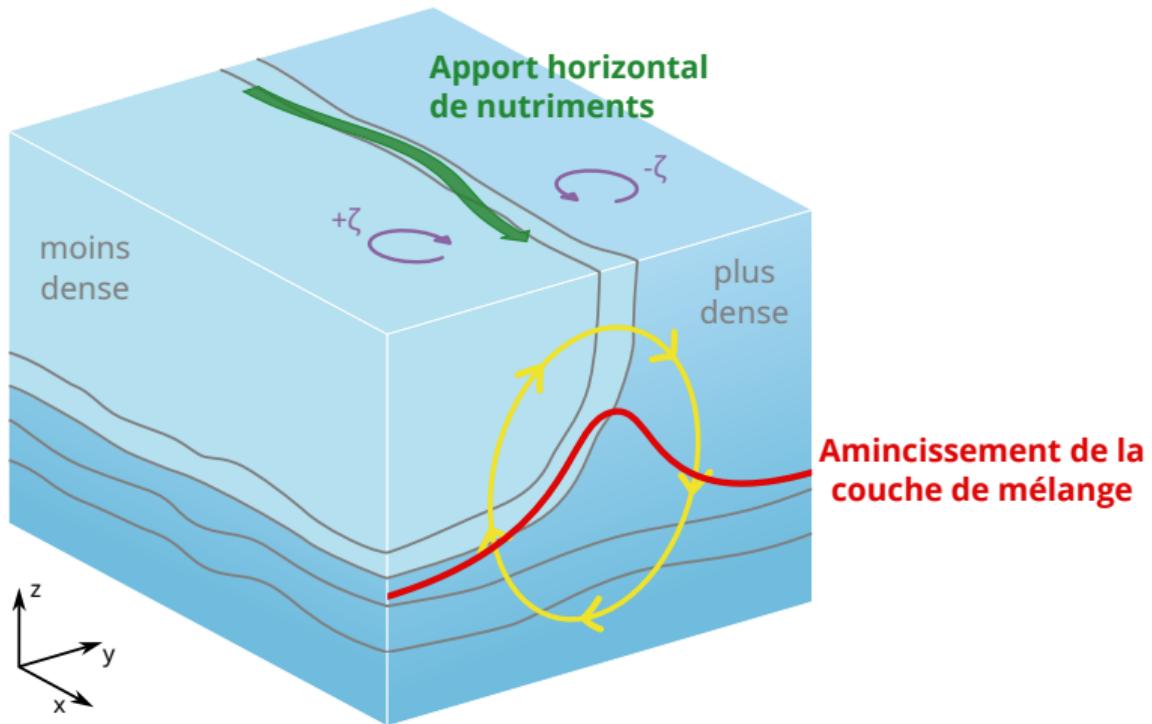
Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



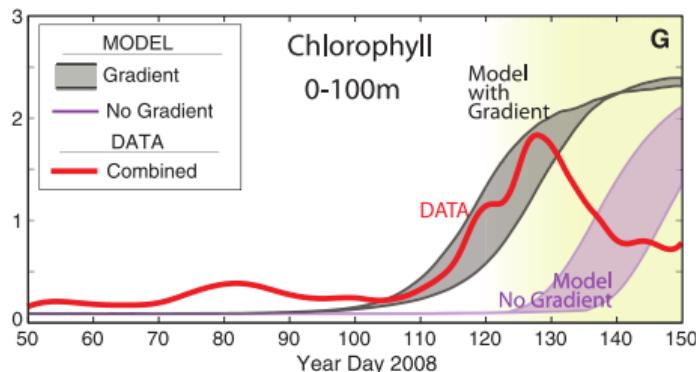
Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



Modification de la phénologie du bloom

Modèle numérique biogéochimique régional

- ▶ run avec fronts (en noir)
→ correspond aux observations (en rouge)
- ▶ run sans fronts (en violet)
→ bloom tardif (≈ 30 jours)

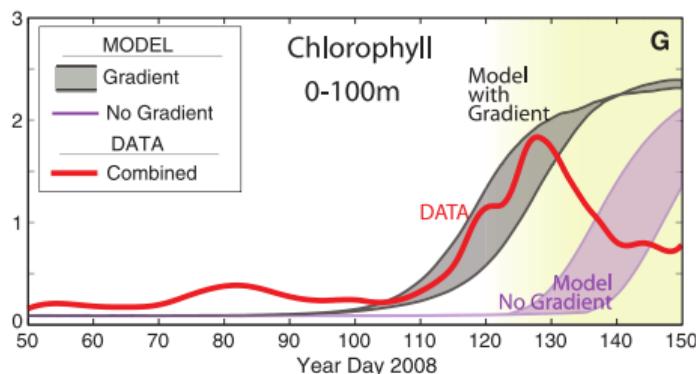


Mahadevan et al. 2012

Modification de la phénologie du bloom

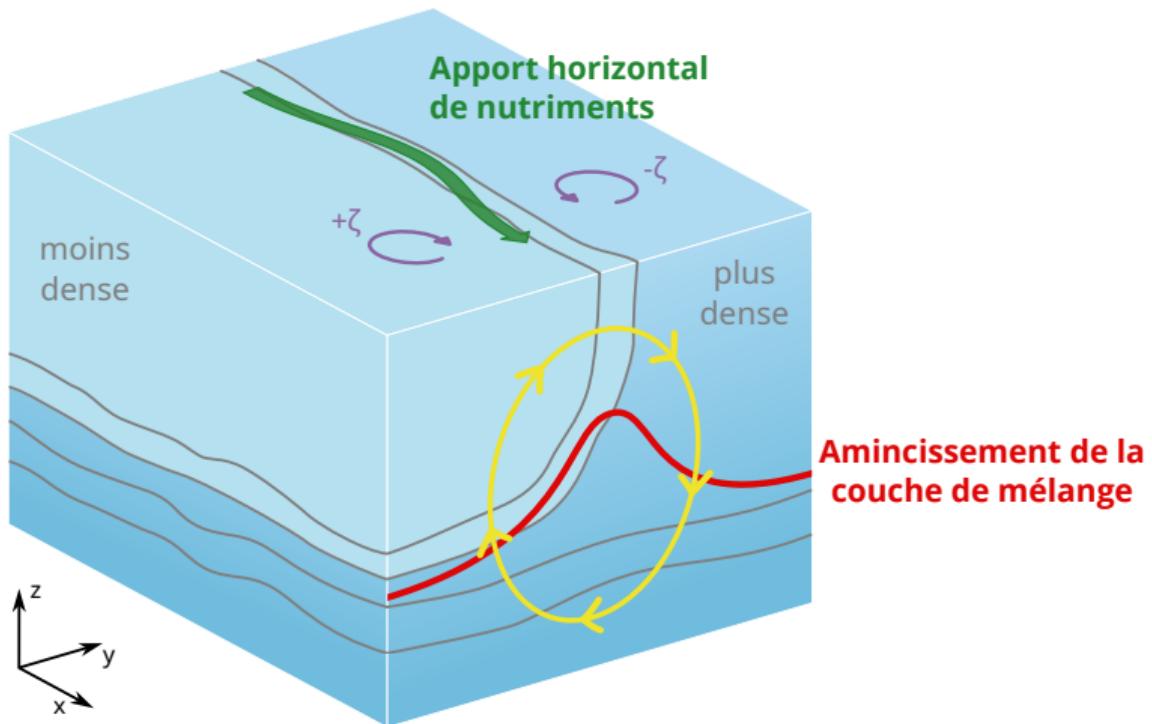
Modèle numérique biogéochimique régional

- ▶ run avec fronts (en noir)
→ correspond aux observations (en rouge)
- ▶ run sans fronts (en violet)
→ bloom tardif (≈ 30 jours)

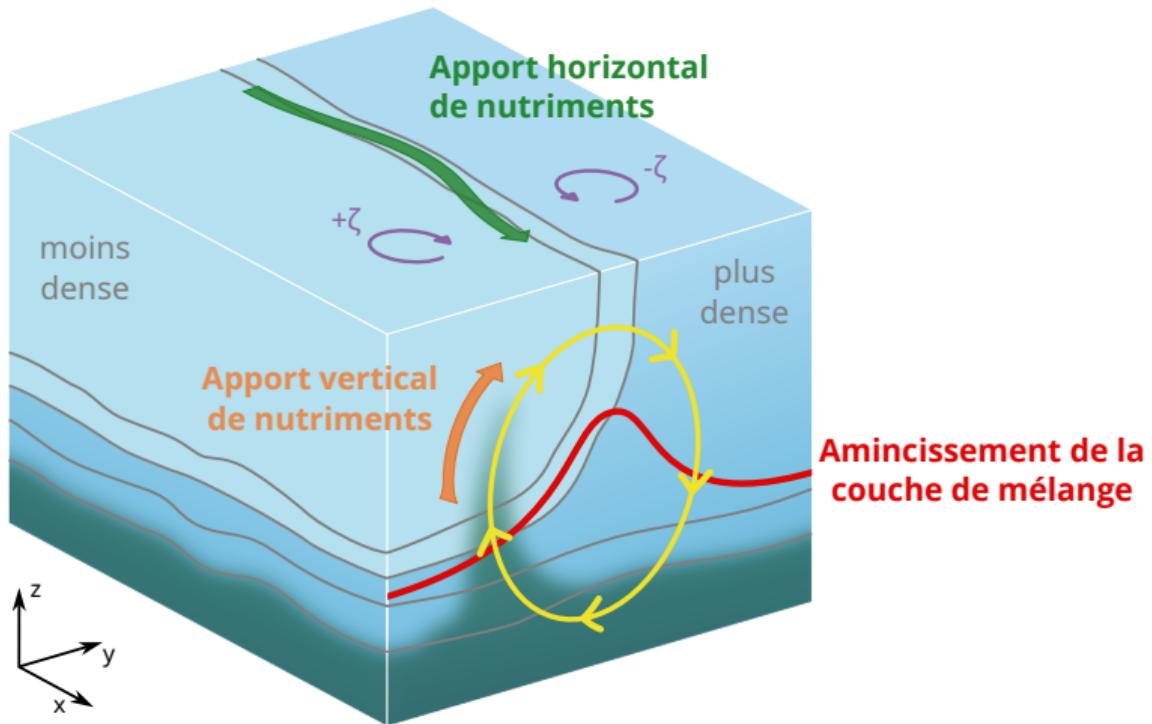


Mahadevan et al. 2012

Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



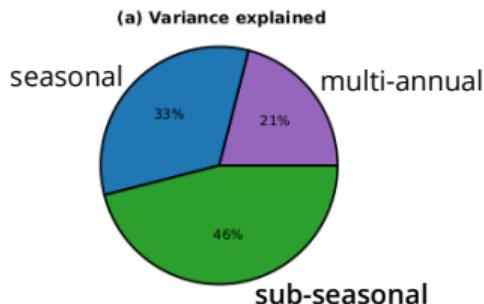
Impact des fronts sur la croissance du phytoplancton



Quantification à grande échelle

- ▶ Variabilité spatio-temporelle de la Chl-a (satellite) en Océan Austral

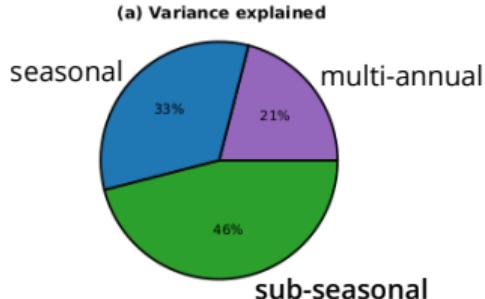
Prend et al. 2022, Keerthi et al. 2022



Quantification à grande échelle

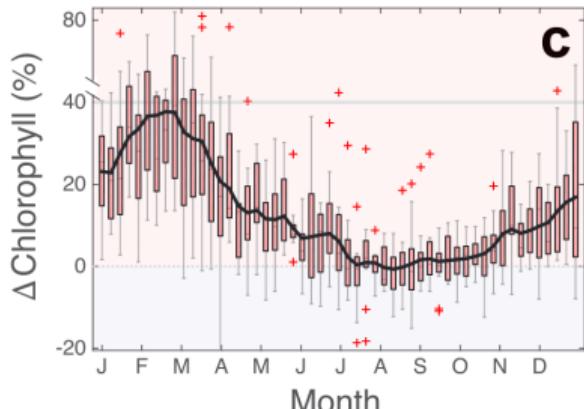
- ▶ Variabilité spatio-temporelle de la Chl-a (satellite) en Océan Austral

Prend et al. 2022, Keerthi et al. 2022



- ▶ Impact des fronts de SST sur Chl-a (Gyre Subtropicale du Pacifique Nord)

Liu & Levine 2016



OBJECTIFS

1. Quantifier la **réponse de la chlorophylle-a** aux dynamiques **frontales**
2. Influence de la **saison**, du **régime** biogéochimique, et du **type** de fronts?
3. Déetecter un **bloom précoce** dans les fronts?

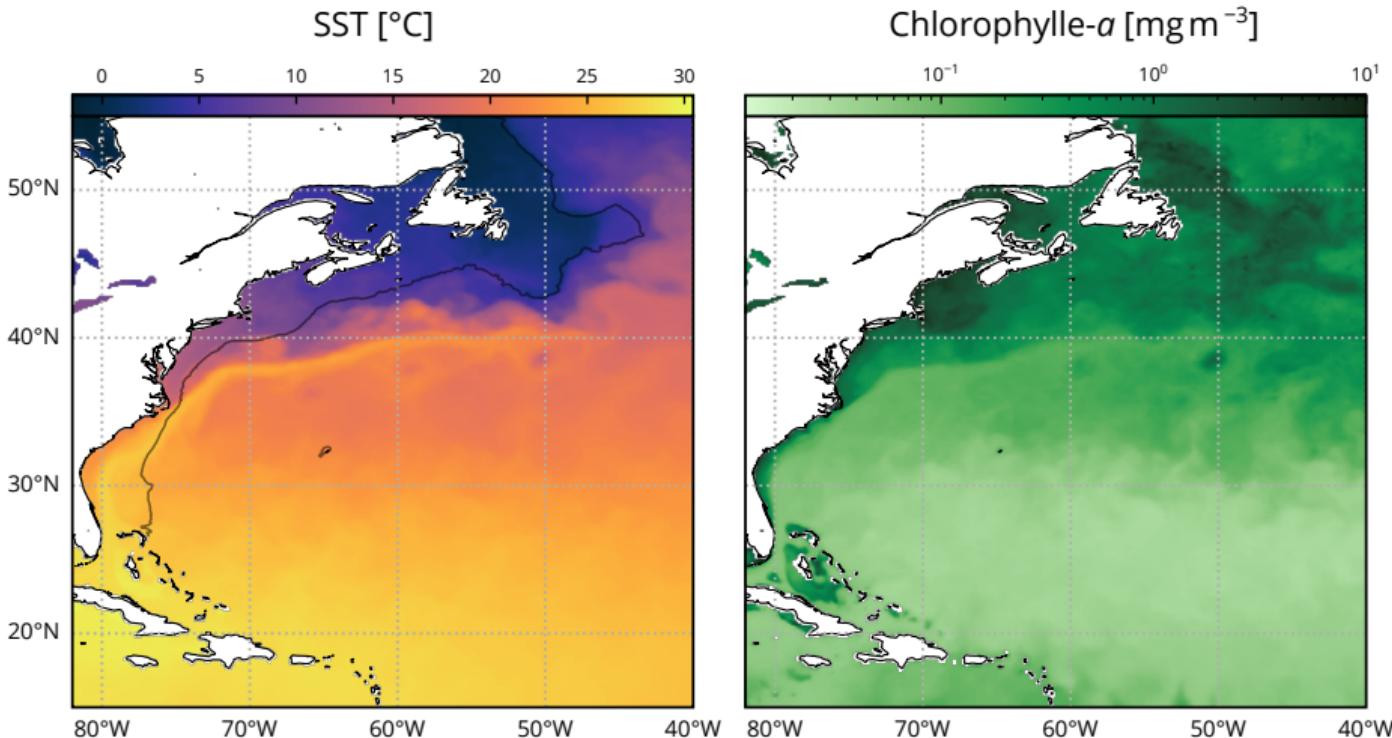
OBJECTIFS

1. Quantifier la **réponse de la chlorophylle-a** aux dynamiques **frontales**
2. Influence de la **saison**, du **régime** biogéochimique, et du **type** de fronts?
3. Déetecter un **bloom précoce** dans les fronts?

OBJECTIFS

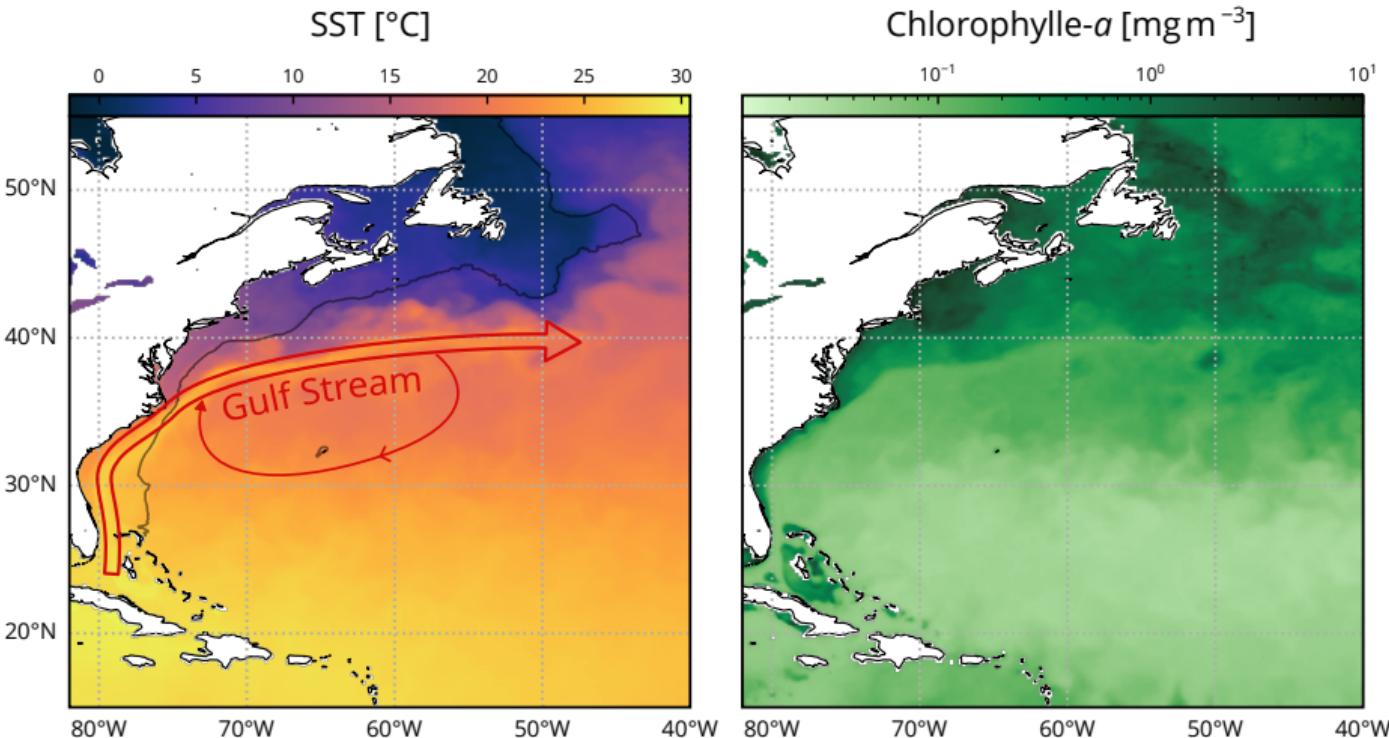
1. Quantifier la **réponse de la chlorophylle-a** aux dynamiques **frontales**
2. Influence de la **saison**, du **régime** biogéochimique, et du **type** de fronts?
3. Déetecter un **bloom précoce** dans les fronts?

Région d'étude : autour du Gulf Stream



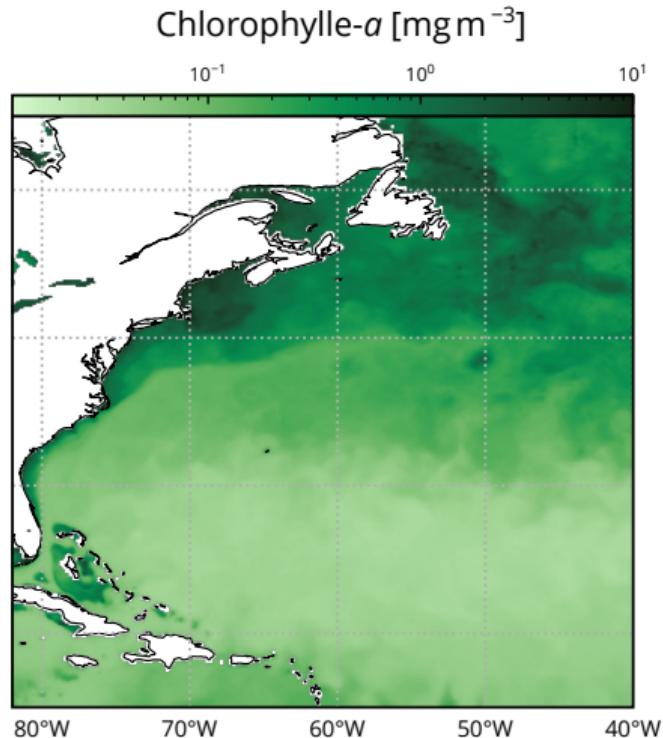
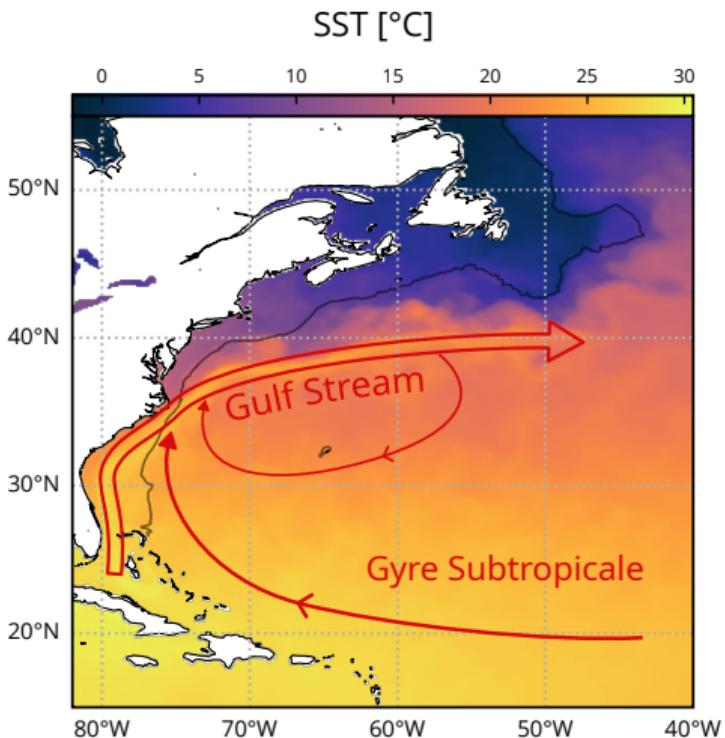
moyennes sur mai 2023

Région d'étude : autour du Gulf Stream



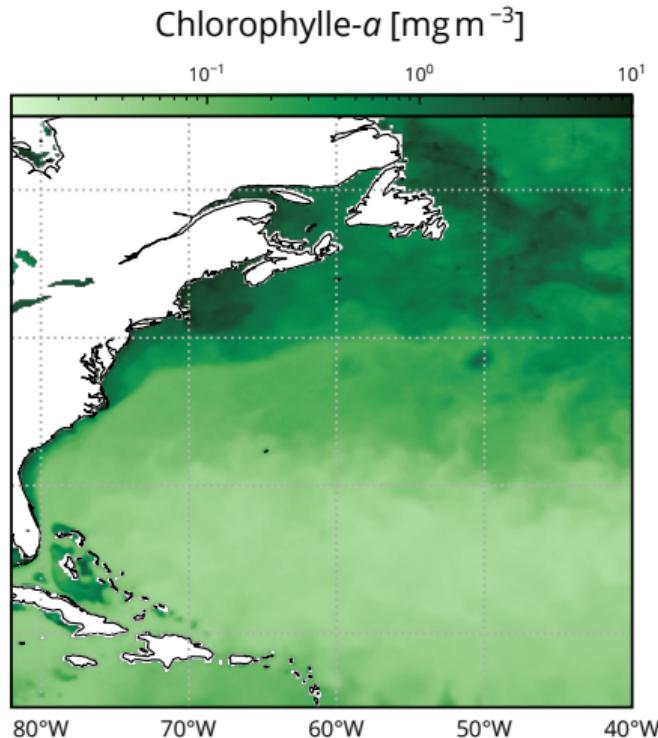
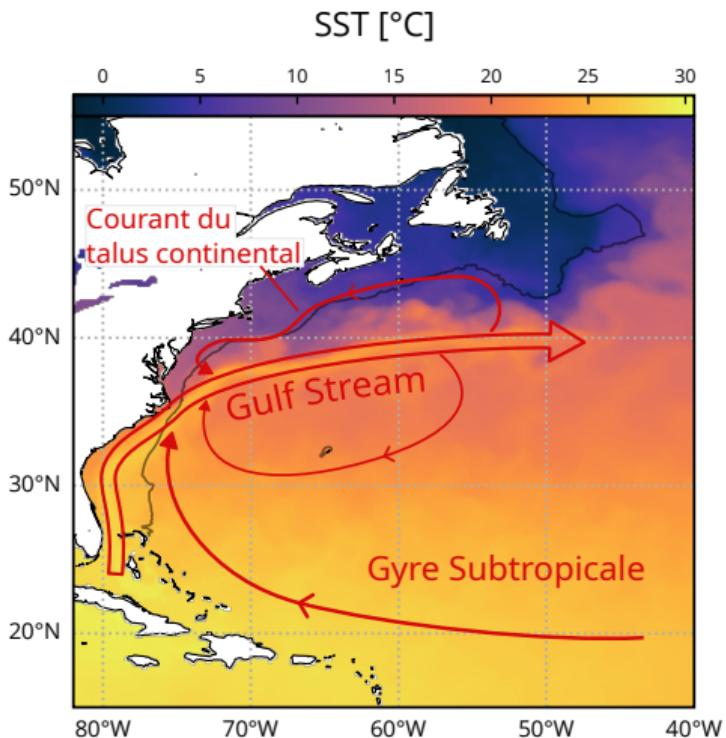
moyennes sur mai 2023

Région d'étude : autour du Gulf Stream



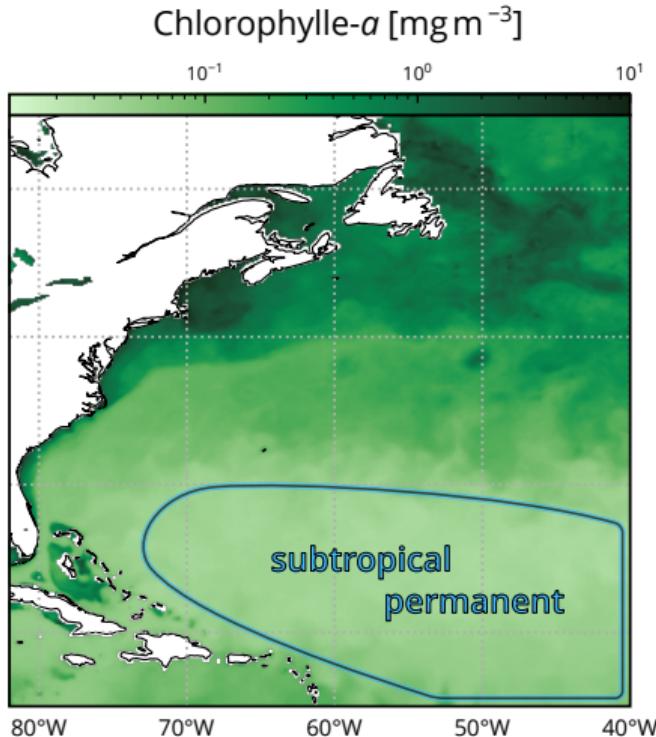
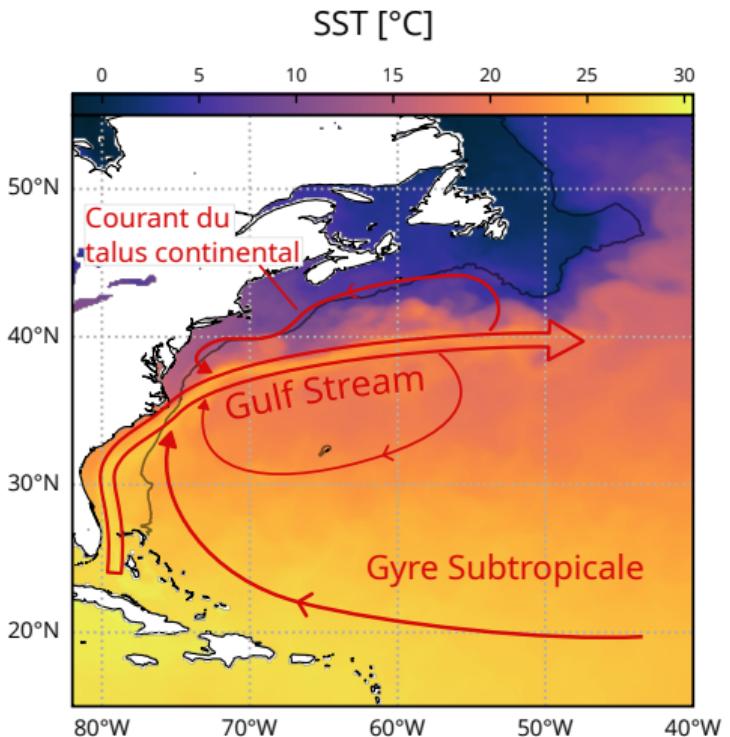
moyennes sur mai 2023

Région d'étude : autour du Gulf Stream



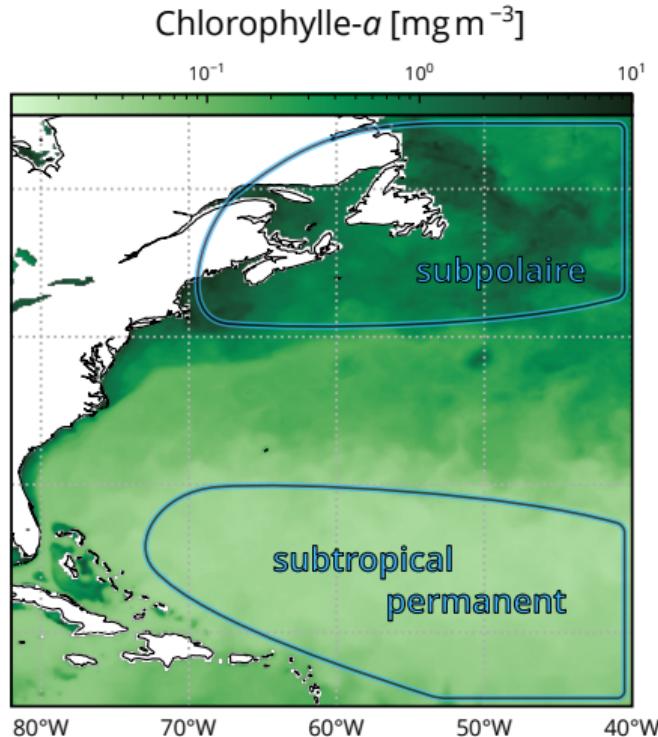
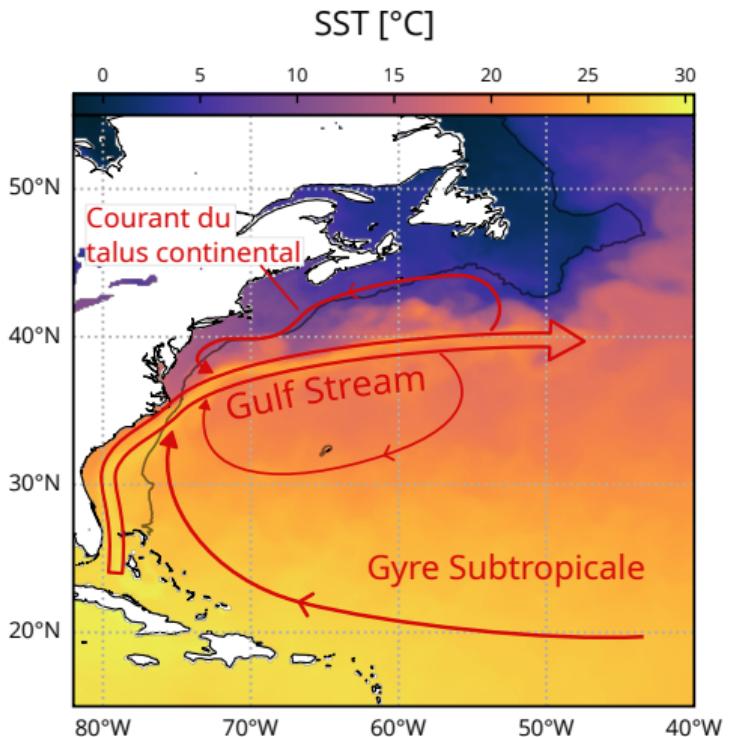
moyennes sur mai 2023

Région d'étude : autour du Gulf Stream



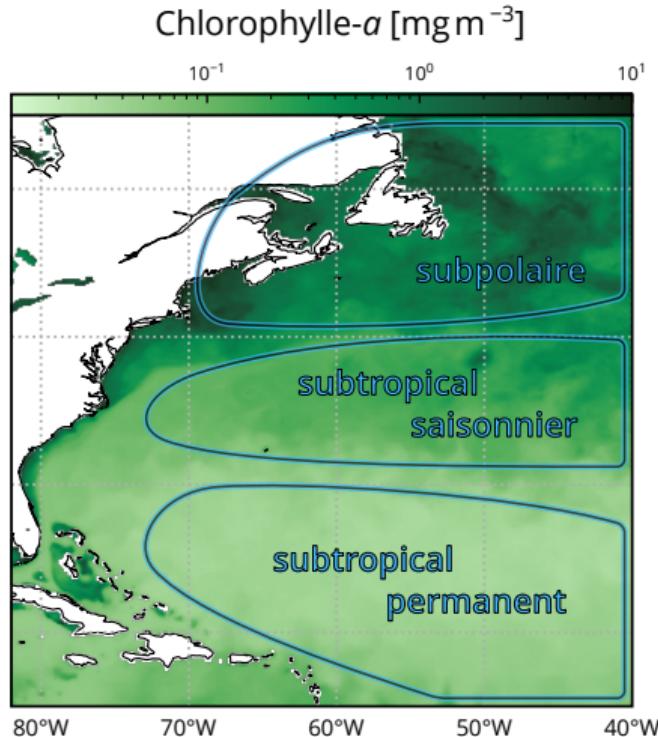
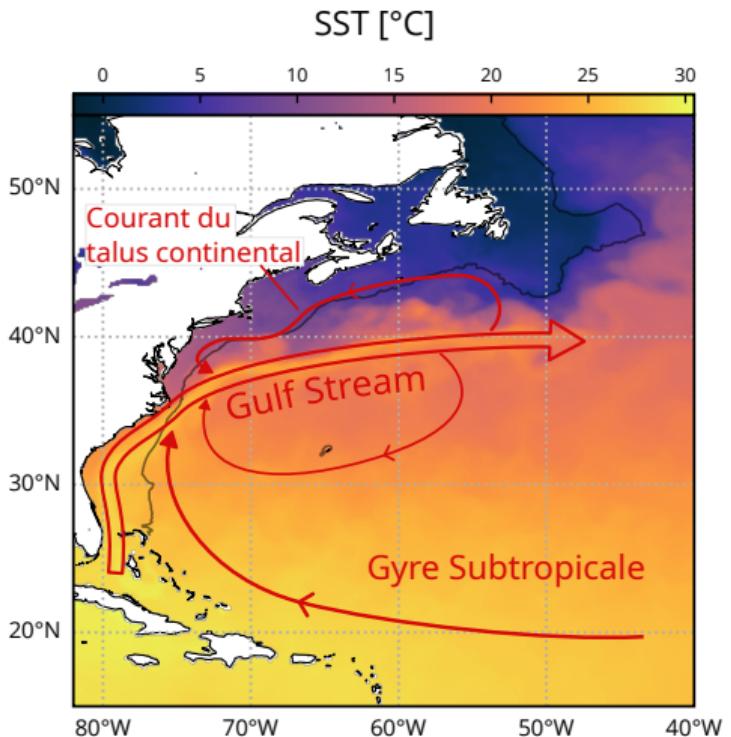
moyennes sur mai 2023

Région d'étude : autour du Gulf Stream



moyennes sur mai 2023

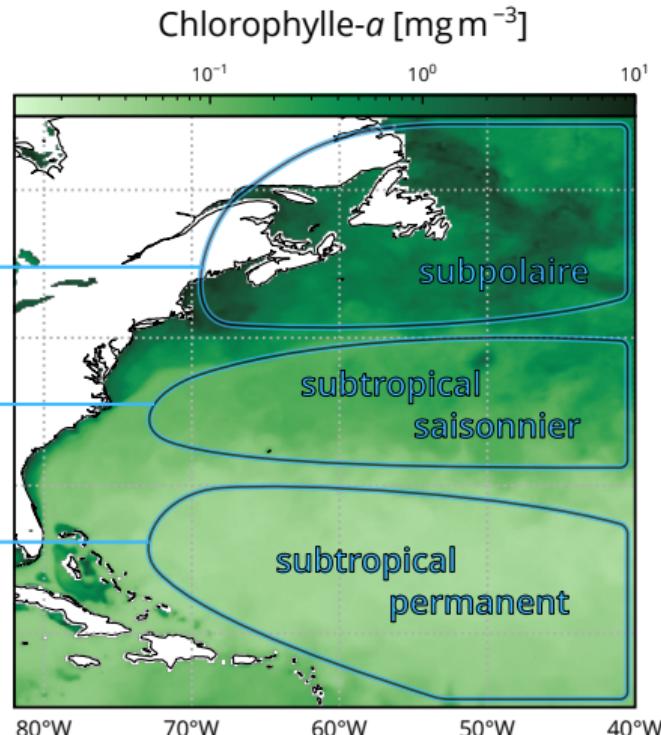
Région d'étude : autour du Gulf Stream



moyennes sur mai 2023

Plan

- 3. Déetecter une avance du bloom**
- 2. Influence de l'intensité des fronts**
- 1. Quantifier l'impact des fronts**



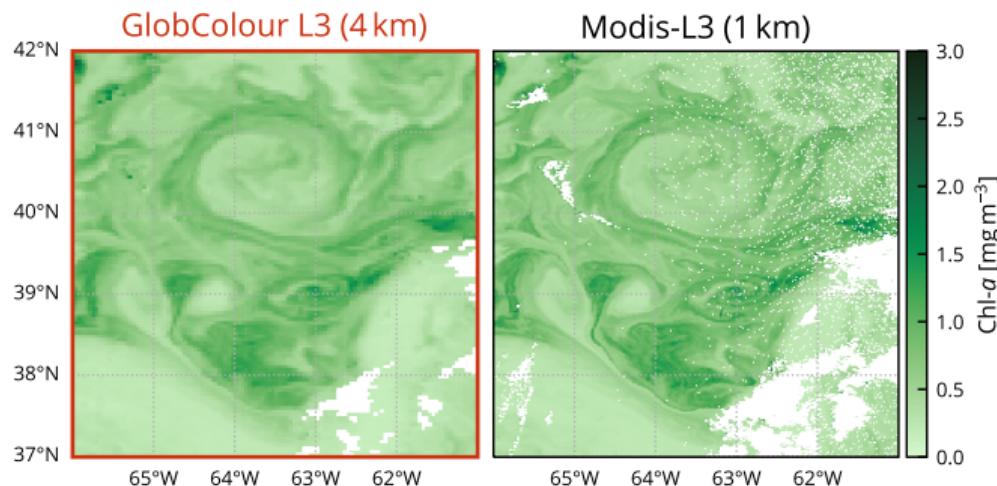
moyennes sur mai 2023

MÉTHODES - DÉTECTION DES FRONTS

Données utilisées : Chl-a

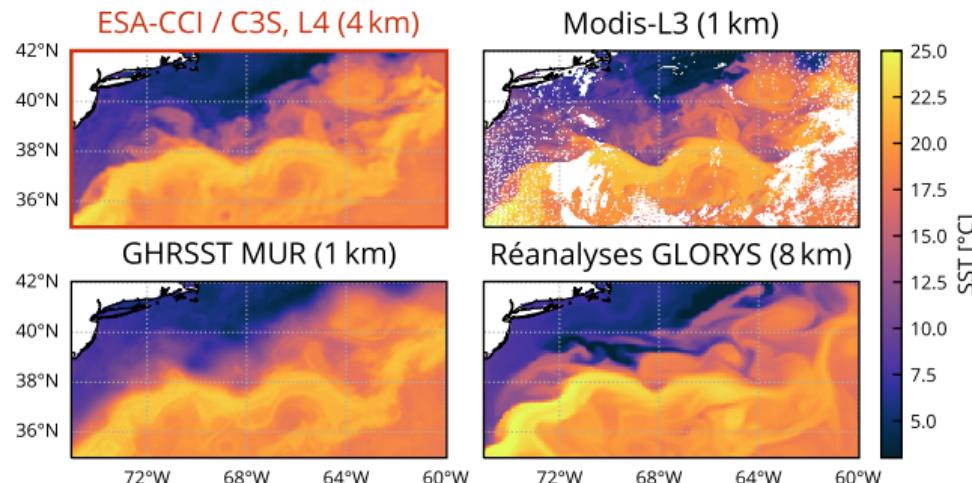
- ▶ Copernicus-Globcolour,
- ▶ journalières, 4km, 2000–2020
- ▶ L3 : multicapteurs, avec nuages

22 avril 2007



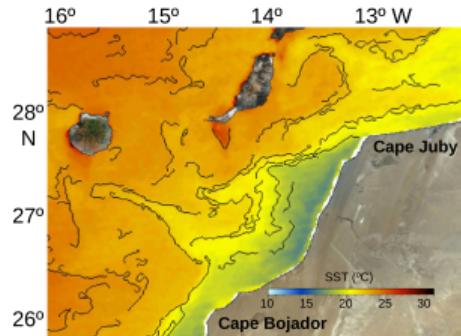
Données utilisées : SST

- ▶ proxy de la densité
- ▶ ESA-SST-CCI / C3S
- ▶ journalières, 4km, 2000–2020
- ▶ L4 : interpolation spatiale de multicapteurs IR, pas de nuages



Déetecter les fronts par satellite

- détection d'une **frontière** :

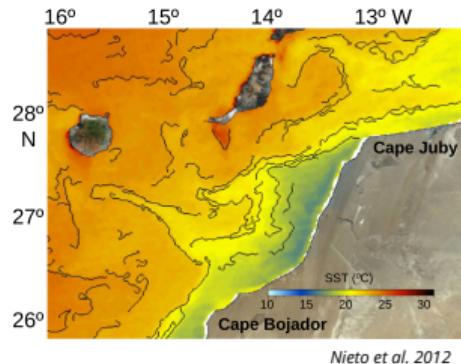


Nieto et al. 2012

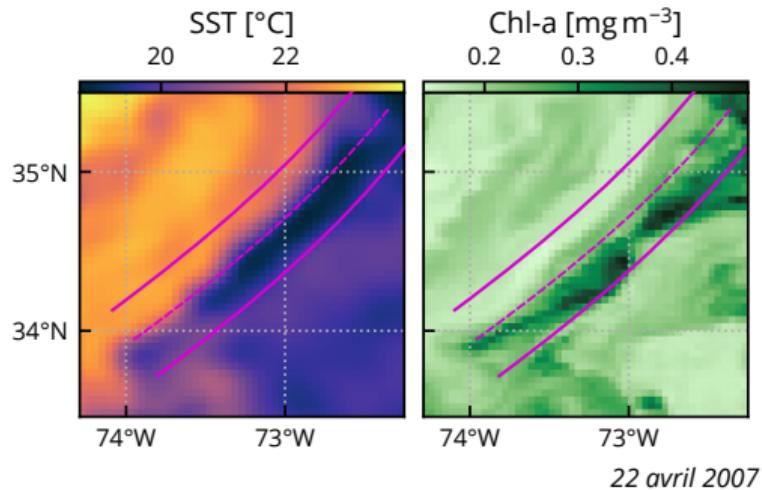
Canny, Cayula-Cornillon,
Nieto, Miller, ...

Déetecter les fronts par satellite

- détection d'une **frontière** :



- détection d'une **zone frontale** :

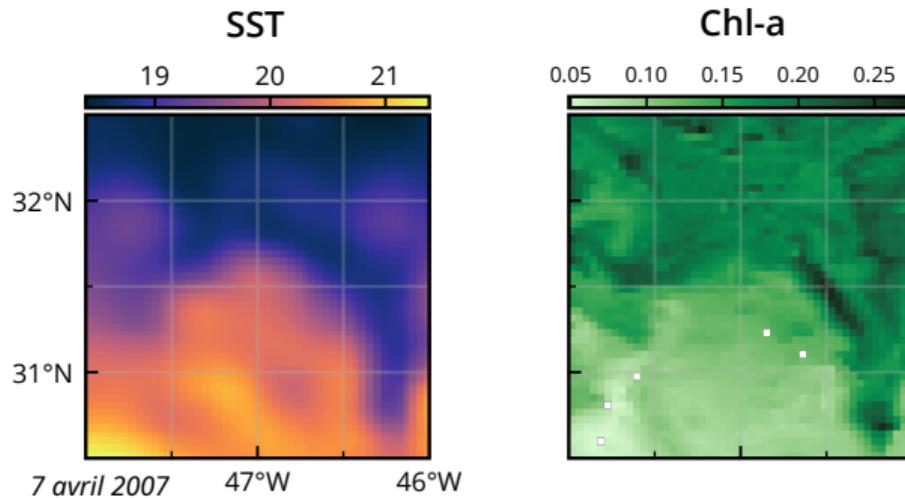


Canny, Cayula-Cornillon,
Nieto, Miller, ...

Belkin-O'Reilly, Liu & Levine 2016

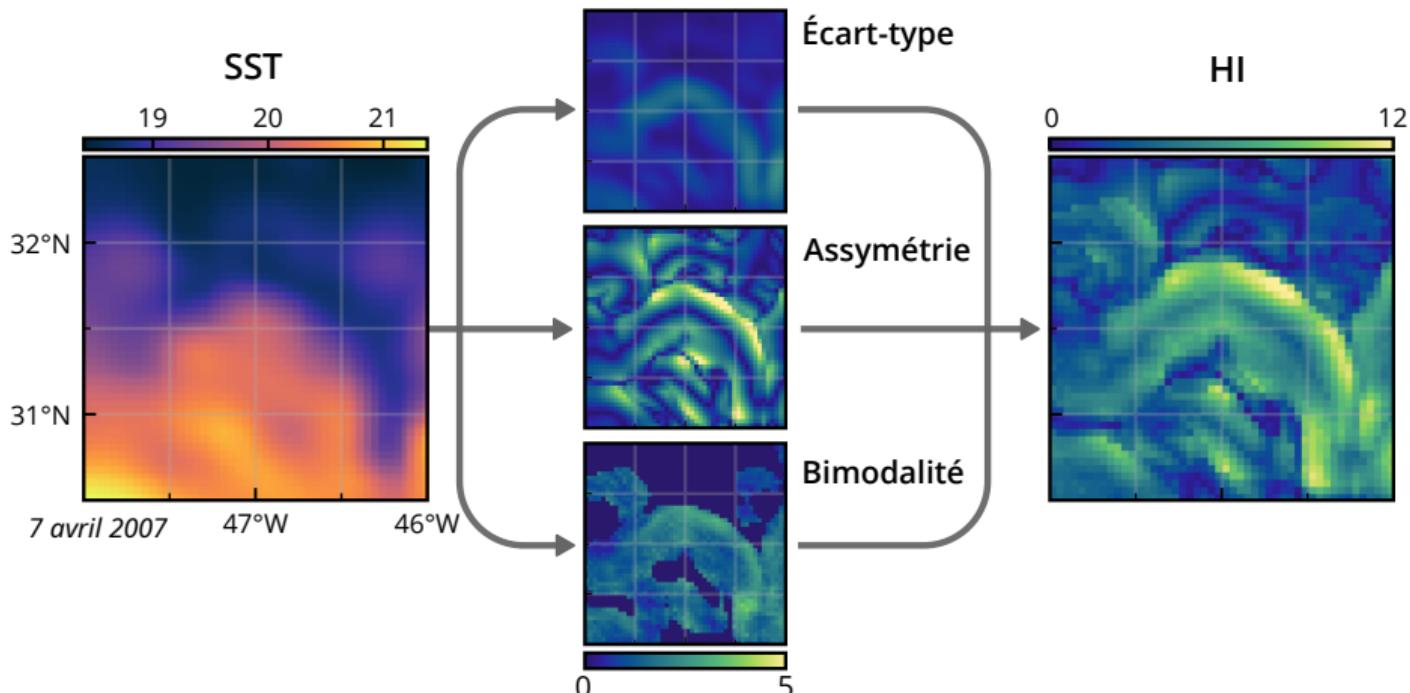
Détection des fronts : méthode du “Heterogeneity-Index” (HI)

- ▶ Application d'une fenêtre glissante sur SST



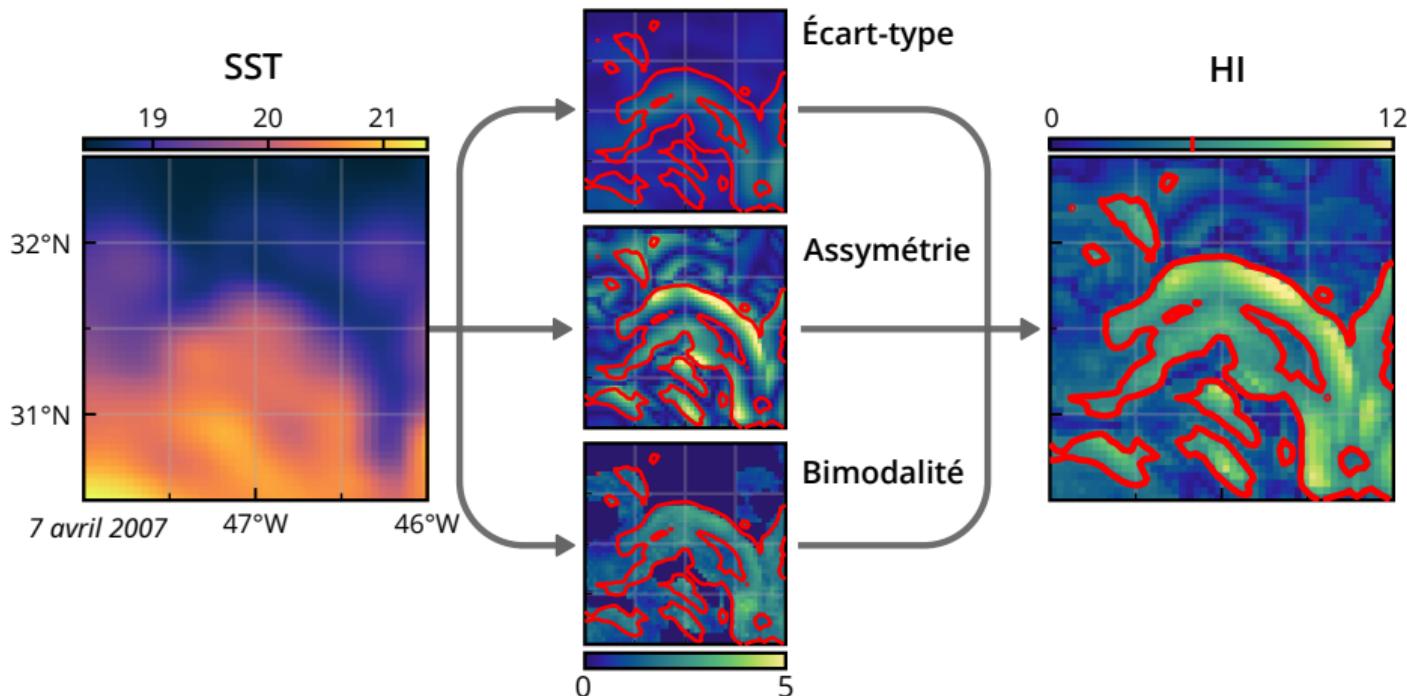
Détection des fronts : méthode du "Heterogeneity-Index" (HI)

- Application d'une fenêtre glissante sur SST



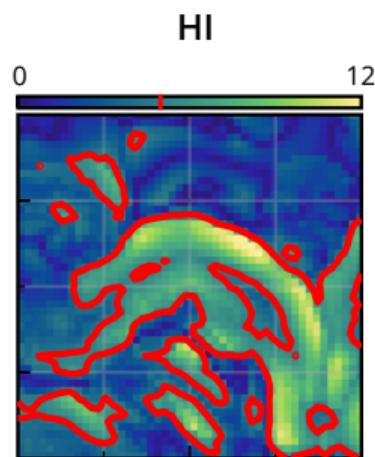
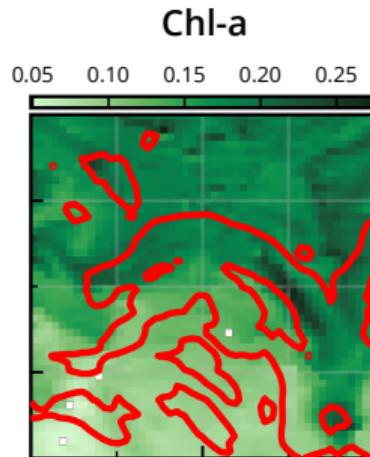
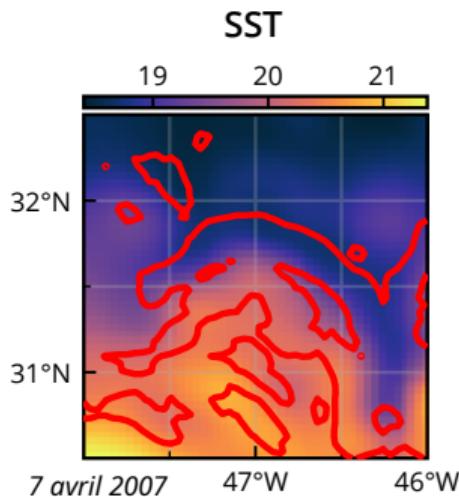
Détection des fronts : méthode du "Heterogeneity-Index" (HI)

- Application d'une fenêtre glissante sur SST

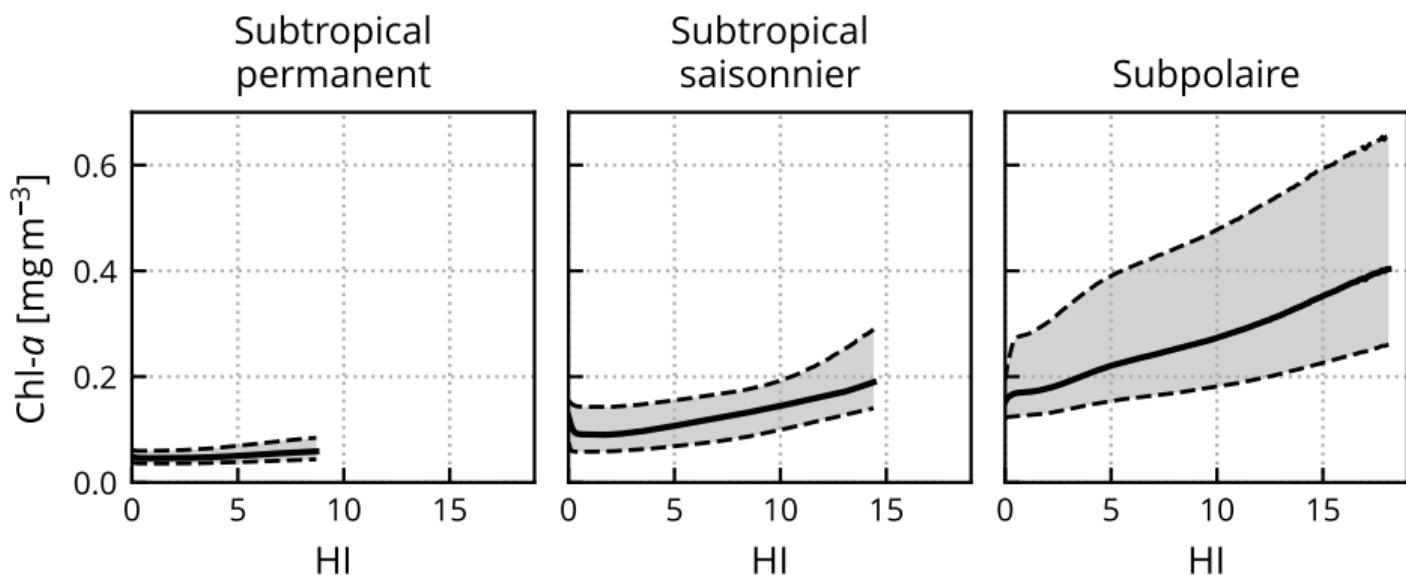


Détection des fronts : méthode du "Heterogeneity-Index" (HI)

- Application d'une fenêtre glissante sur SST

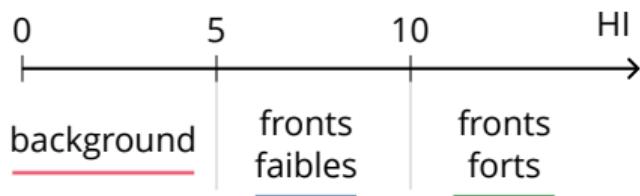


Évolution de la chl-a avec le HI

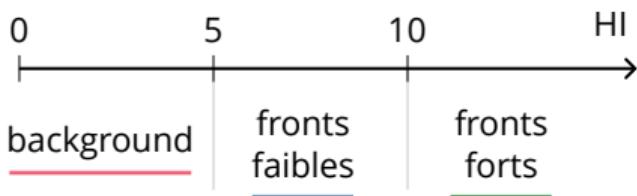


sur 2000-2020

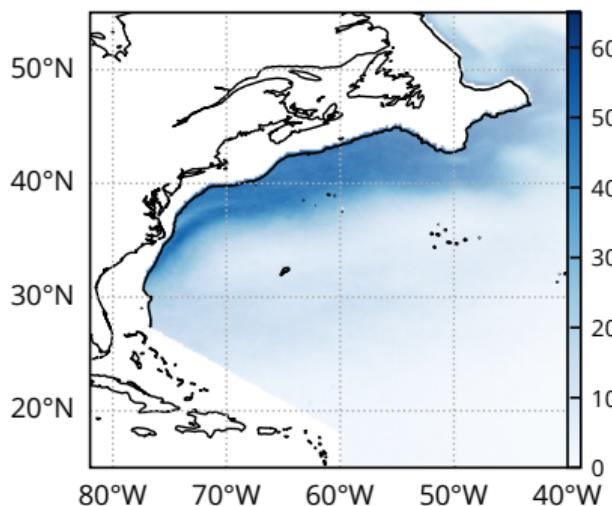
Cartes de probabilité de présence des fronts



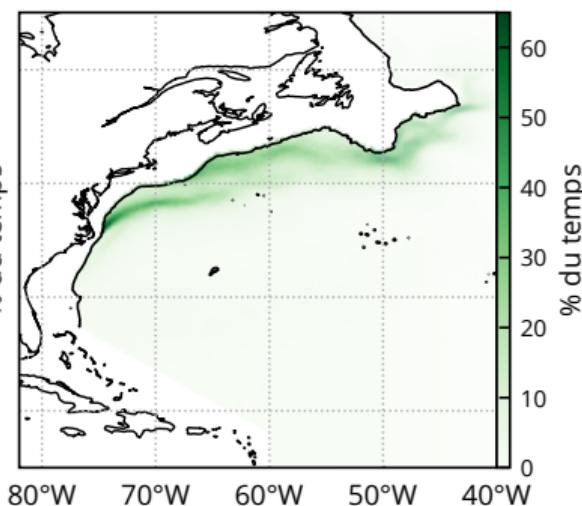
Cartes de probabilité de présence des fronts



Occurrence des fronts **faibles**



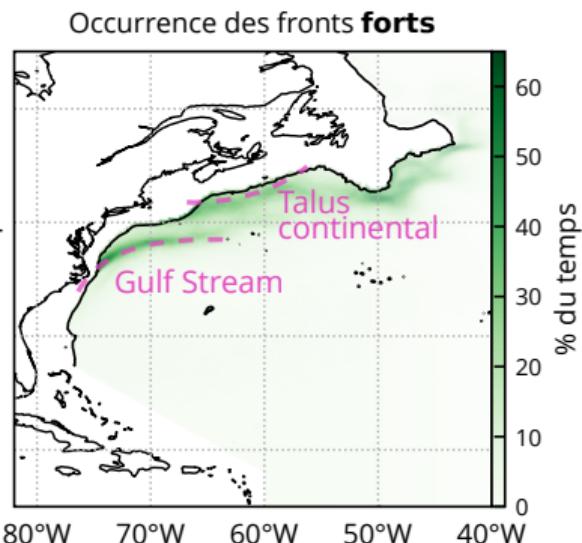
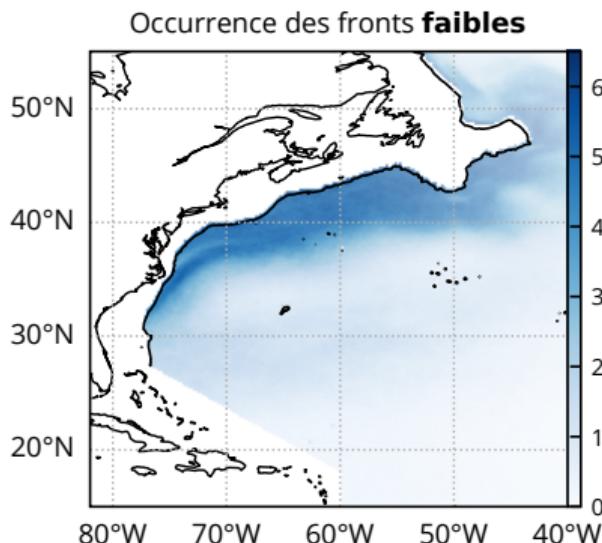
Occurrence des fronts **forts**



Cartes de probabilité de présence des fronts

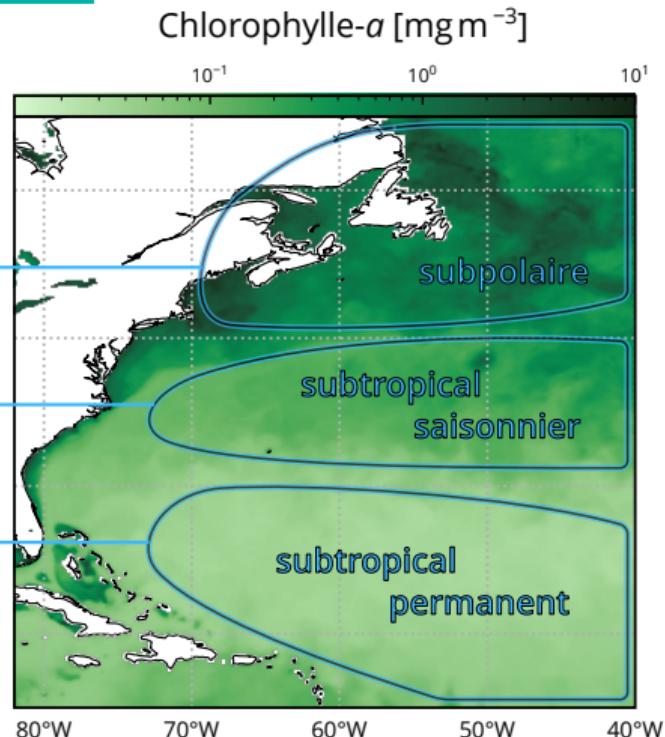
fronts **faibles**
submésoscale, éphémères

fronts **forts**
mésoscale, permanents

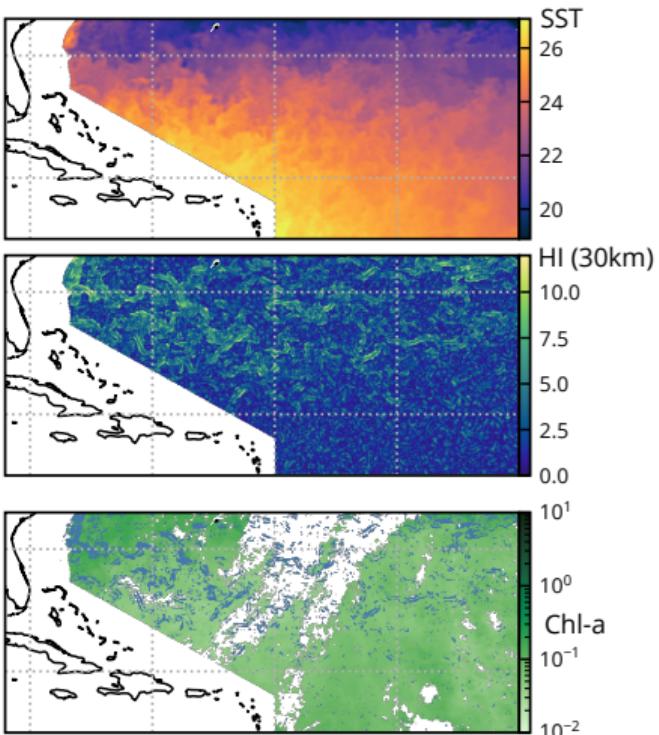


PARTIE 1

- 1. Quantifier l'impact des fronts**
- 2. Influence de l'intensité des fronts**
- 3. Déetecter une avance du bloom**

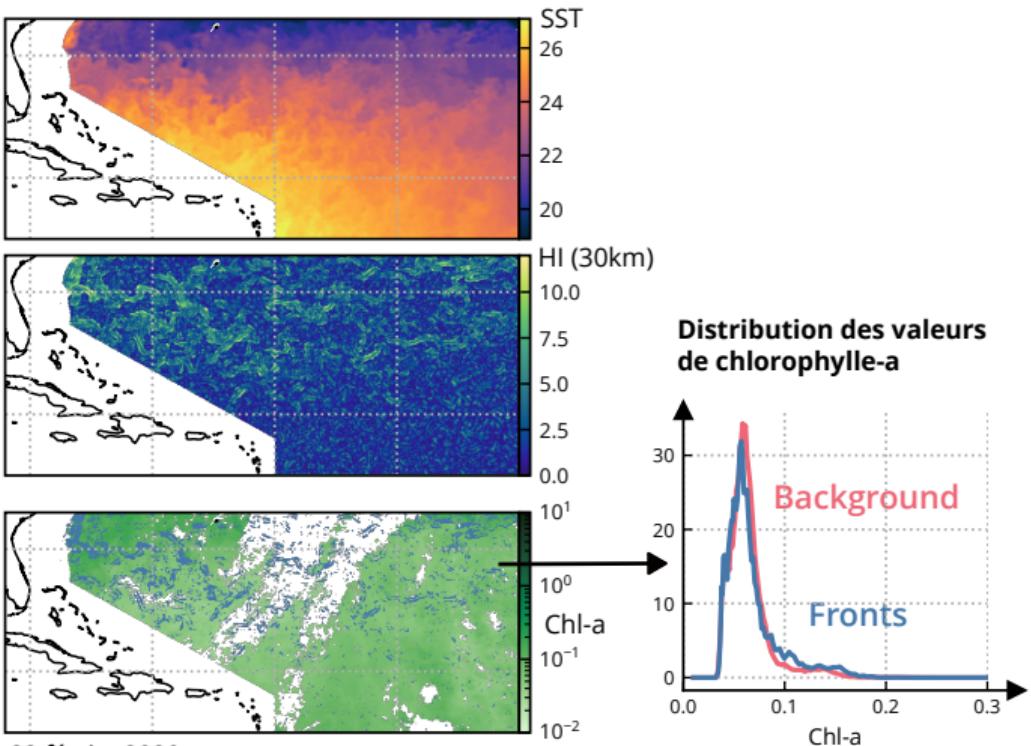


Mesure de l'impact des fronts



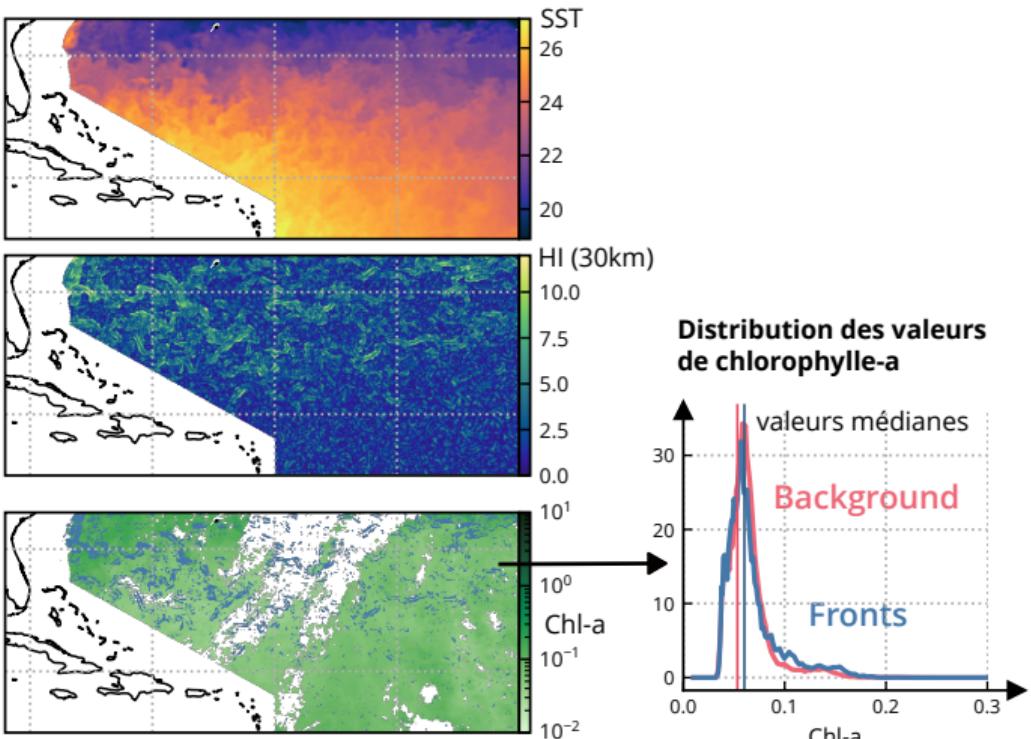
23 février 2020

Mesure de l'impact des fronts

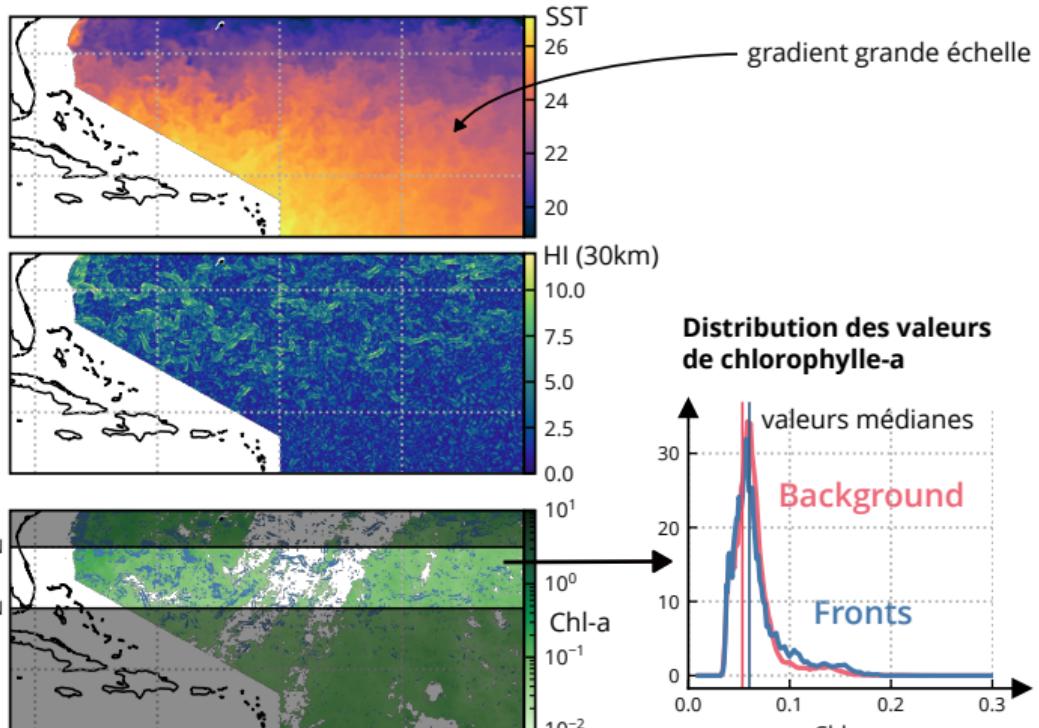


23 février 2020

Mesure de l'impact des fronts

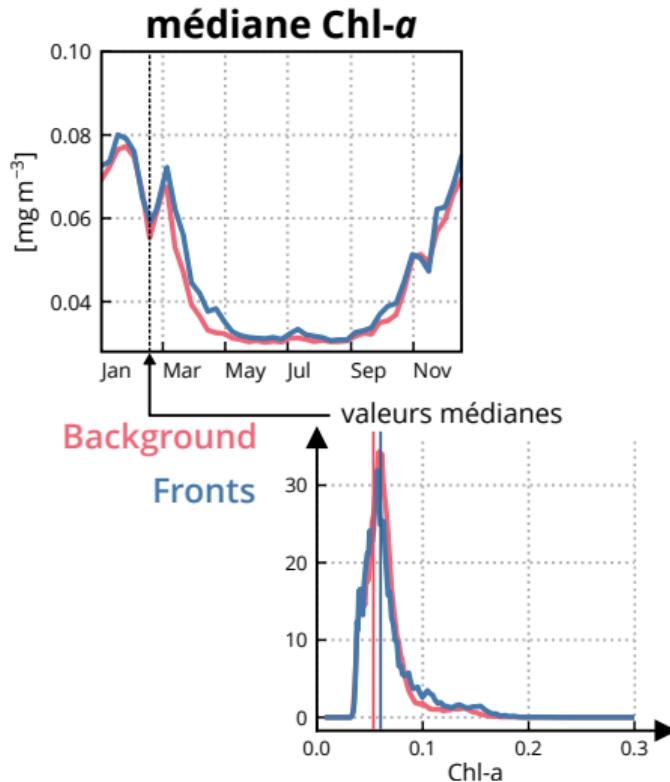


Mesure de l'impact des fronts



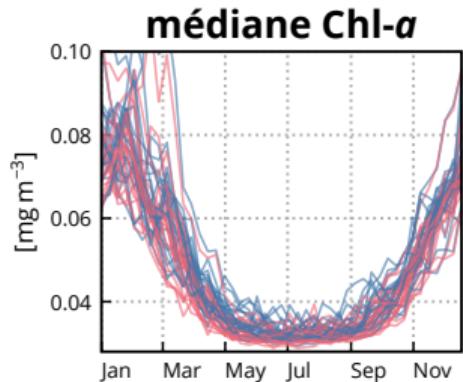
23 février 2020

Augmentation locale de la chl-a



dans la bande 25–30°N

Augmentation locale de la chl-a

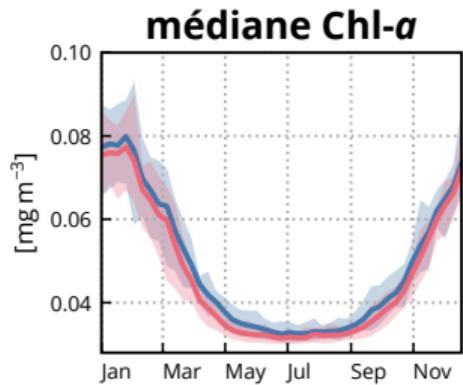


Background

Fronts

dans la bande 25–30°N

Augmentation locale de la chl-a

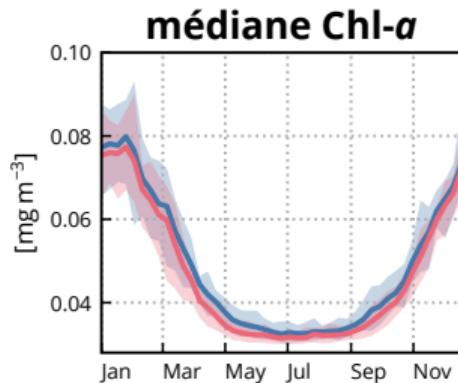


Background

Fronts

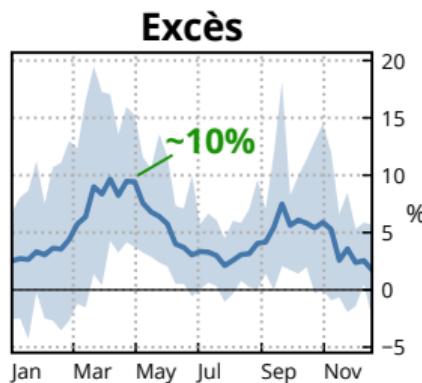
dans la bande 25–30°N

Augmentation locale de la chl-a



Background

Fronts

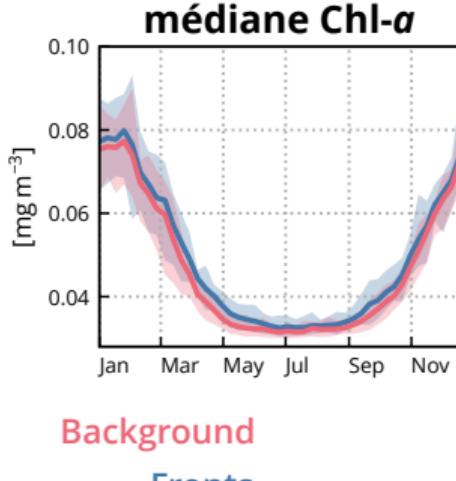


$$E = \frac{\text{fronts} - \text{background}}{\text{background}}$$

> mesure locale

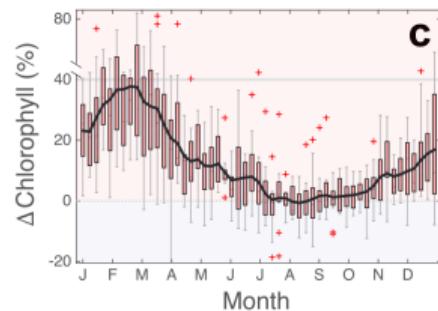
dans la bande 25–30°N

Augmentation locale de la chl-a



$$E = \frac{\text{fronts} - \text{background}}{\text{background}}$$

- > mesure **locale**
- > moins élevé que l'estimation de Liu & Levine 2016 (gyre Pacifique Nord)



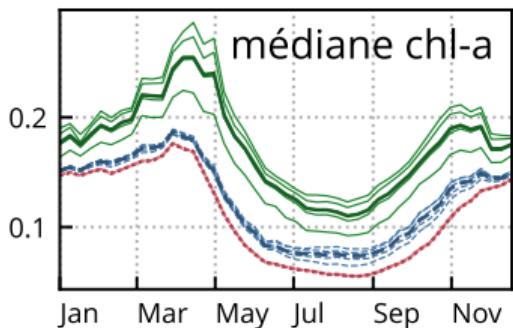
dans la bande 25–30°N

Comparaison avec l'estimation de Liu & Levine (2016)

- ▶ taille de la fenêtre glissante (10km vs 30km)?
- ▶ Correction du biais de grande échelle?

Comparaison avec l'estimation de Liu & Levine (2016)

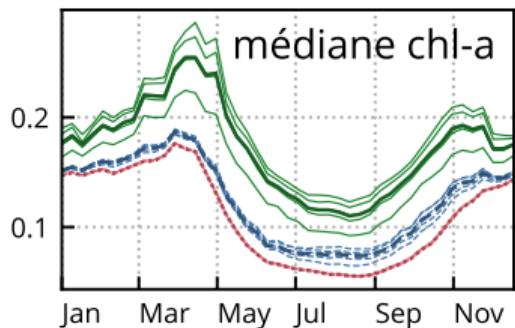
- ▶ taille de la fenêtre glissante (10km vs 30km)?
- ▶ Correction du biais de grande échelle?



excès peu sensibles à la taille
(<15 % de variation)

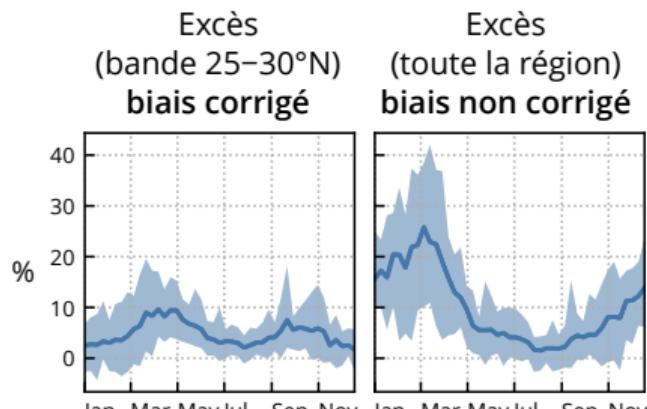
Comparaison avec l'estimation de Liu & Levine (2016)

- taille de la fenêtre glissante (10km vs 30km)?



excès peu sensibles à la taille (<15 % de variation)

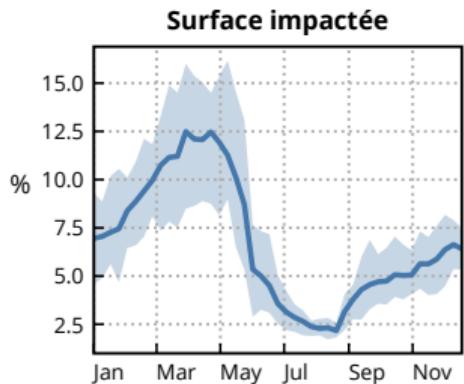
- Correction du biais de grande échelle?



surestimation si non corrigé

Effet régional sur la chl-a

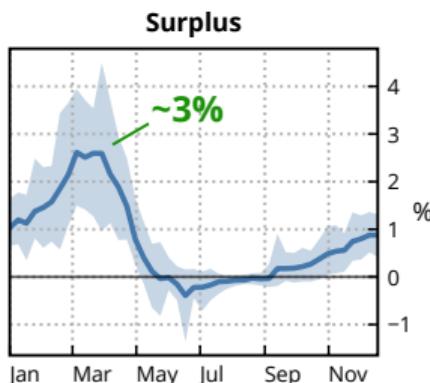
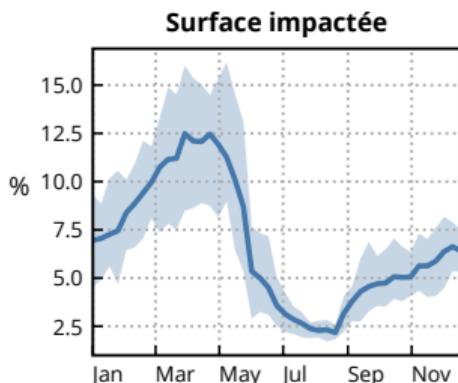
- ▶ Tenir compte de la surface des fronts



climatologie sur toute la région

Effet régional sur la chl-a

- ▶ Tenir compte de la surface des fronts



climatologie sur toute la région

à partir de la moyenne

$$S = \frac{\text{total} - \text{background}}{\text{background}}$$

diagnostic **régional**

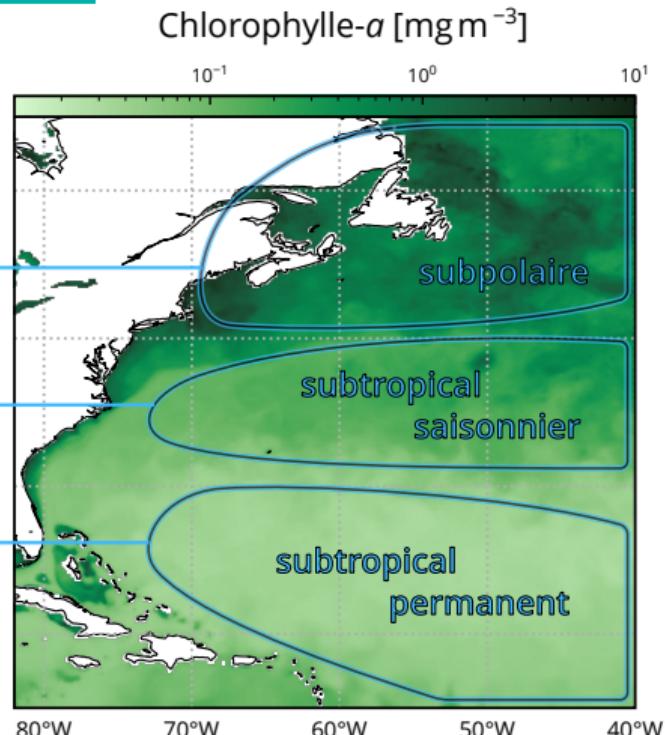
- ▶ effet des fronts très faible à l'échelle régionale

Conclusion partie 1

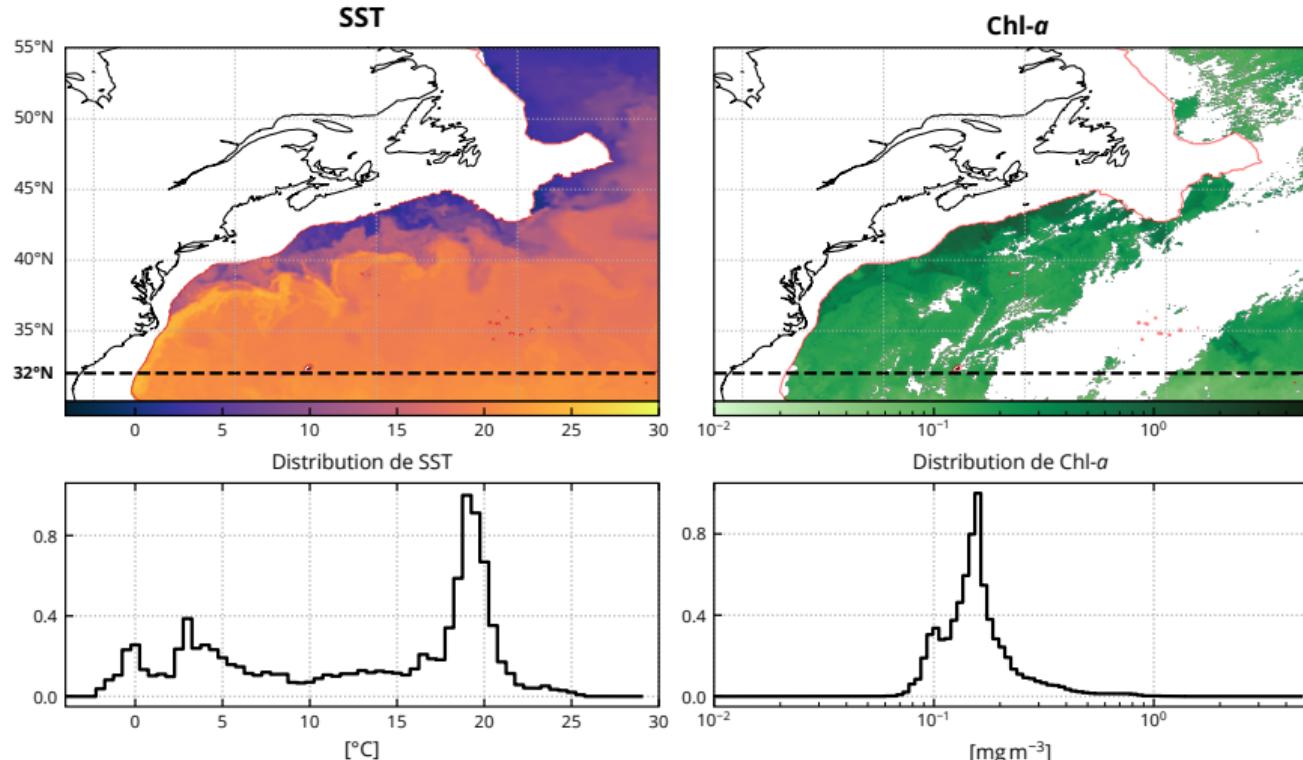
- ▶ augmentation locale de la Chl-a ($\approx 10\%$)
 - apport vertical de nutriments par les fronts
- ▶ important de corriger biais de grande échelle
- ▶ effet régional faible si la surface des fronts prise en compte ($\approx 3\%$)

PARTIE 2

3. Déetecter une avance du bloom
2. Influence de l'intensité des fronts
1. Quantifier l'impact des fronts

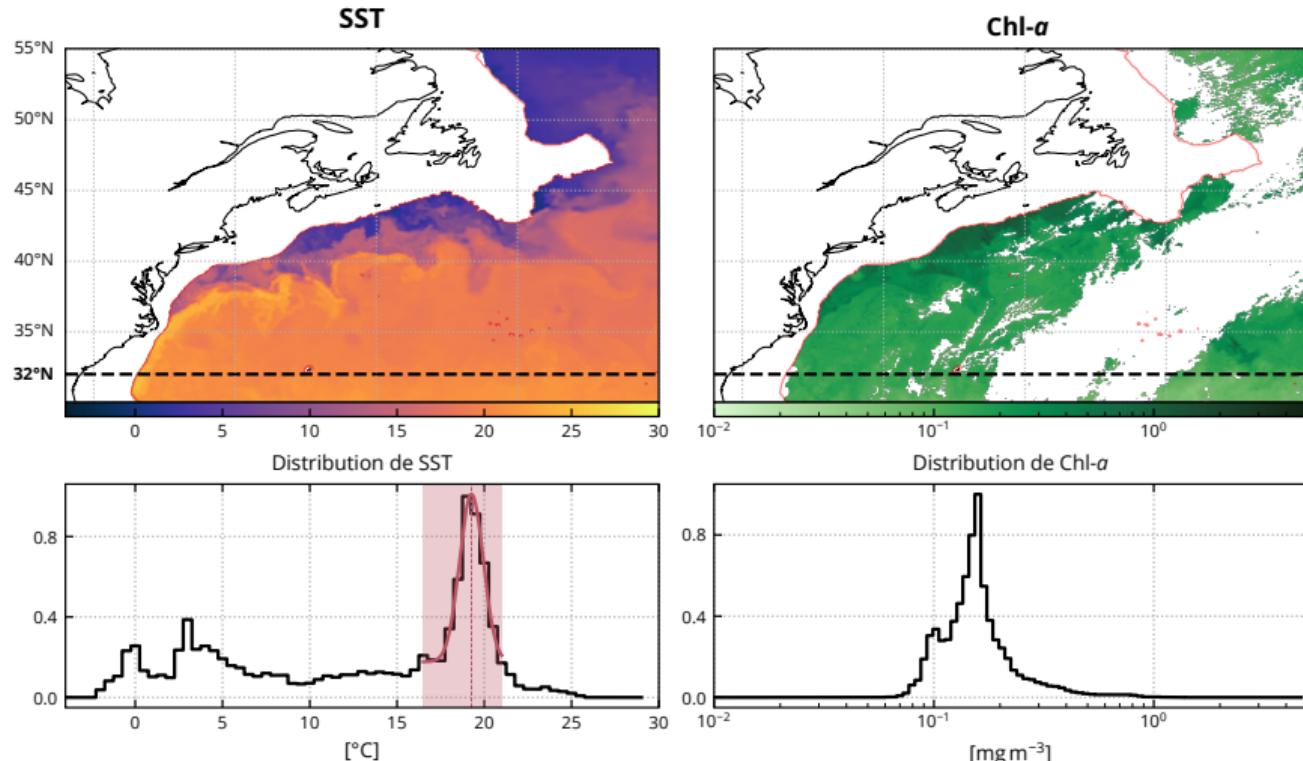


Détection journalière du mur nord du Gulf Stream



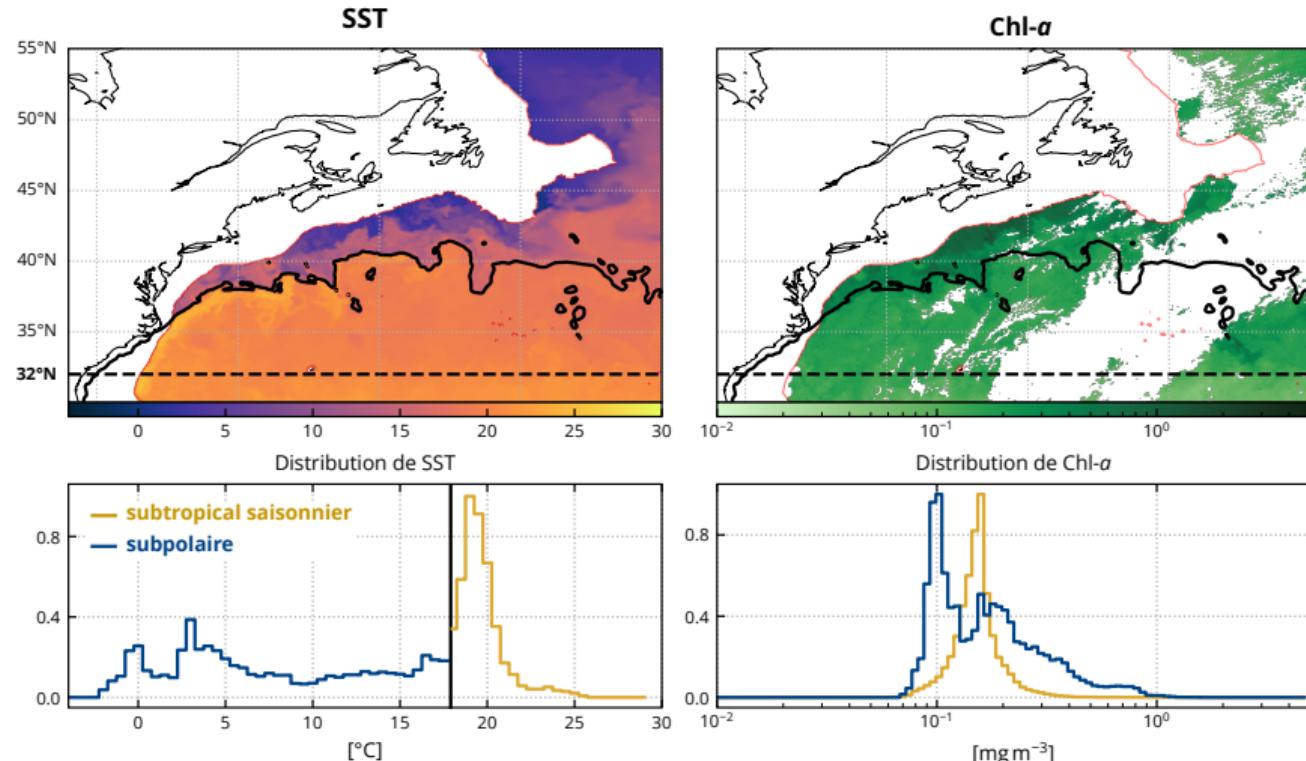
23 février 2020

Détection journalière du mur nord du Gulf Stream



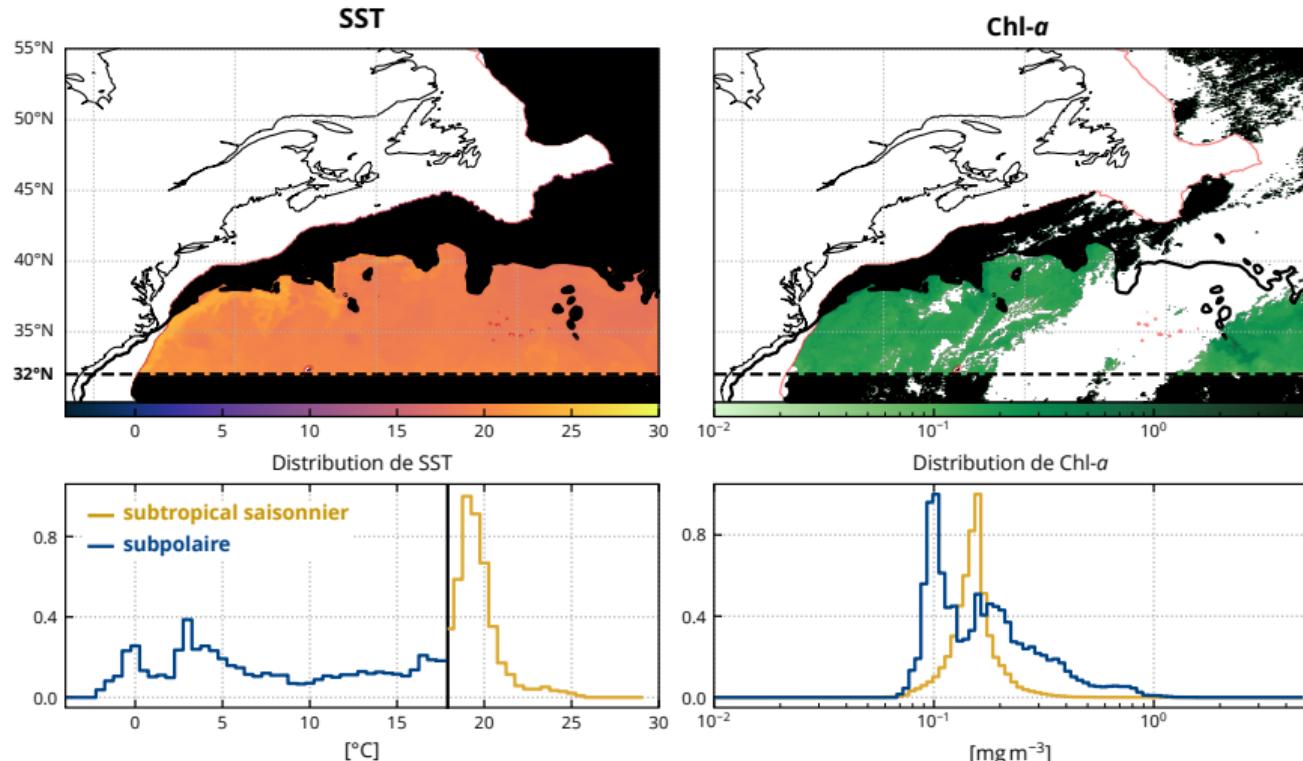
23 février 2020

Détection journalière du mur nord du Gulf Stream



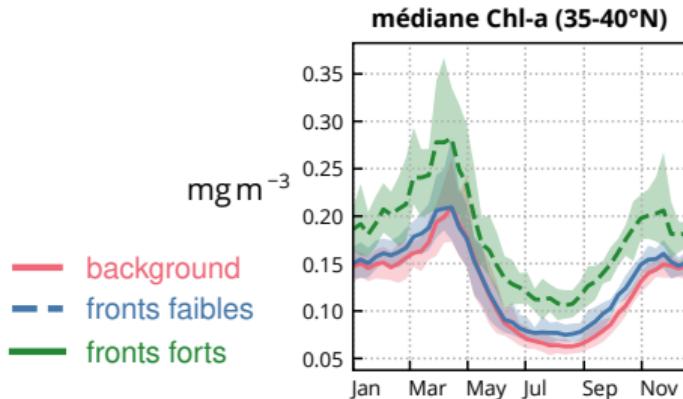
23 février 2020

Détection journalière du mur nord du Gulf Stream



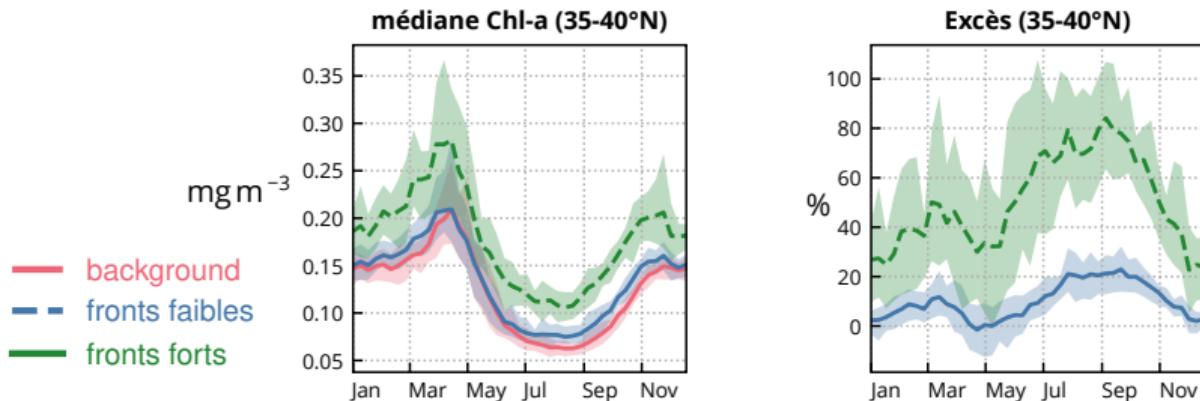
23 février 2020

Impact des fronts (faibles et forts) sur la Chl-a



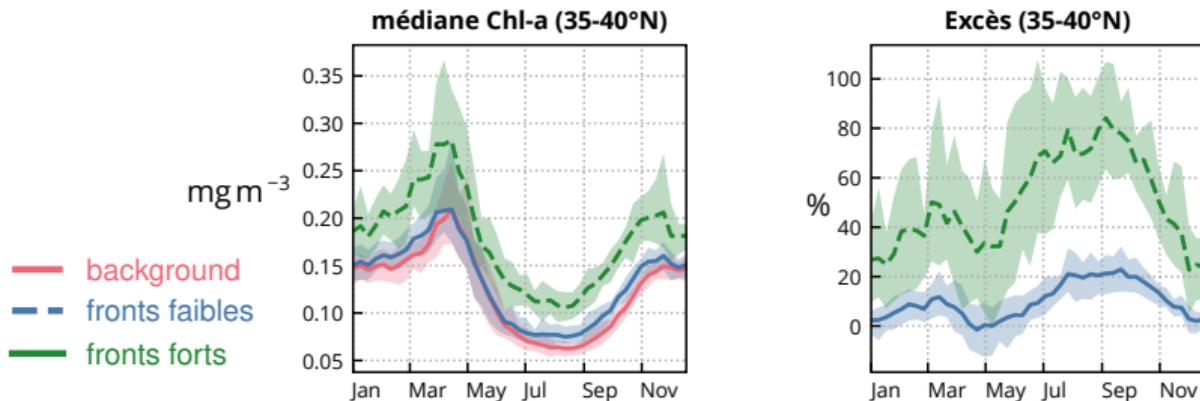
- ▶ Effet local beaucoup plus important dans les **fronts forts**
 - impact du 'nutrient stream'
 - circulations plus profondes

Impact des fronts (faibles et forts) sur la Chl-a



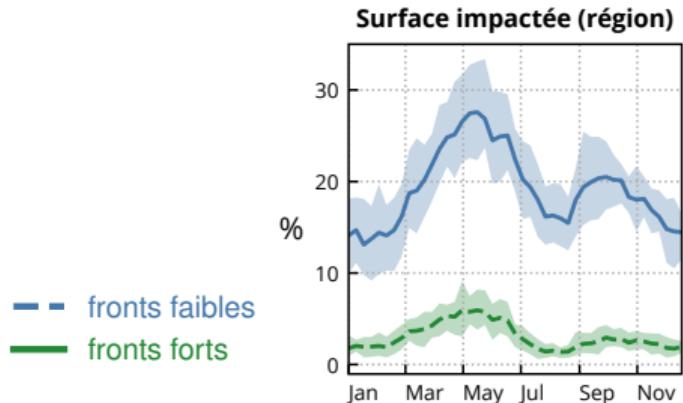
- ▶ Effet local beaucoup plus important dans les **fronts forts**
 - impact du 'nutrient stream'
 - circulations plus profondes

Impact des fronts (faibles et forts) sur la Chl-a



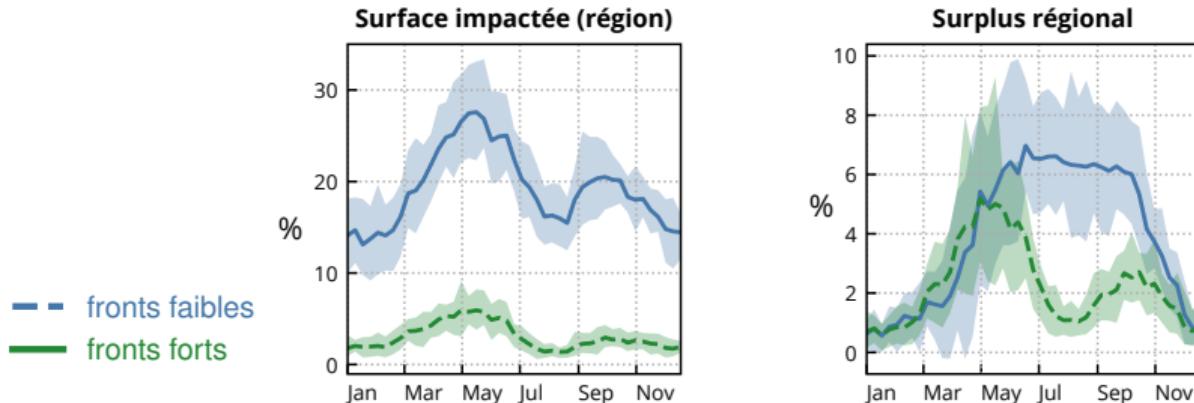
- ▶ Effet local beaucoup plus important dans les **fronts forts**
 - impact du 'nutrient stream'
 - circulations plus profondes

Impact des fronts (faibles et forts) sur la Chl-a



- ▶ Les fronts forts occupent moins de **surface**
- ▶ Effet régional **comparable** pour les fronts forts et faibles

Impact des fronts (faibles et forts) sur la Chl-a



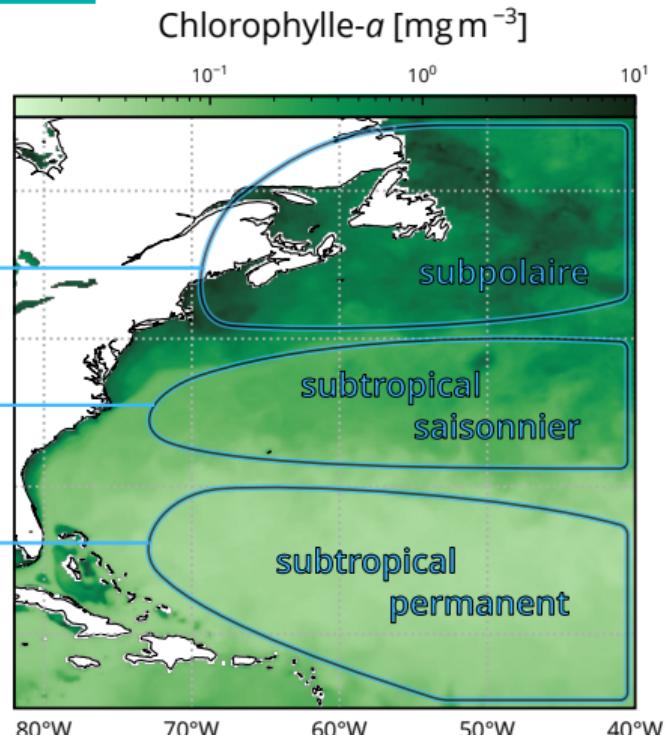
- ▶ Les fronts forts occupent moins de **surface**
- ▶ Effet régional **comparable** pour les fronts forts et faibles

Conclusion partie 2

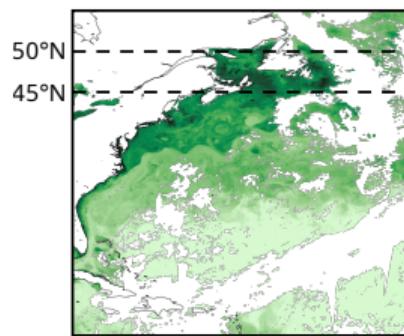
- ▶ augmentation de chl-a beaucoup plus importante dans les fronts forts
 - nutrient stream
 - circulation plus profonde
- ▶ effet à l'échelle régionale comparable entre fronts forts et faibles

PARTIE 3

- 3. Déetecter une avance du bloom**
- 2. Influence de l'intensité des fronts**
- 1. Quantifier l'impact des fronts**



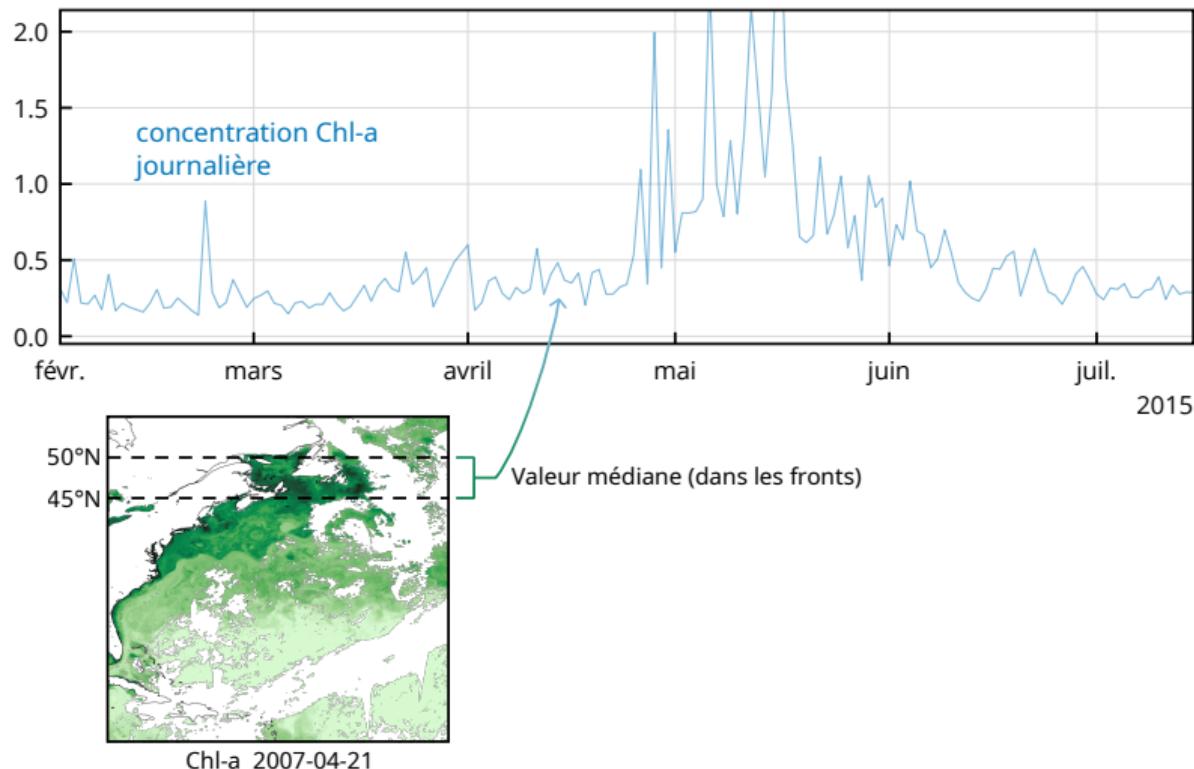
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



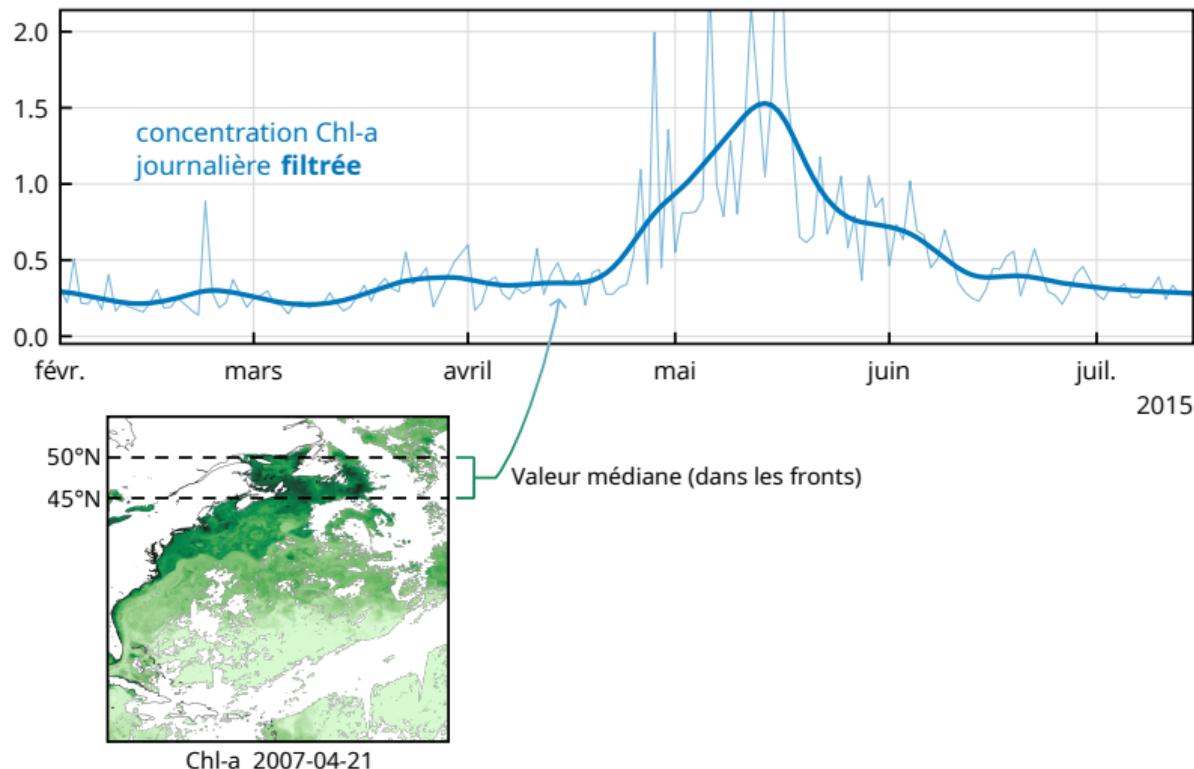
Chl-a 2007-04-21

Valeur médiane (dans les fronts)

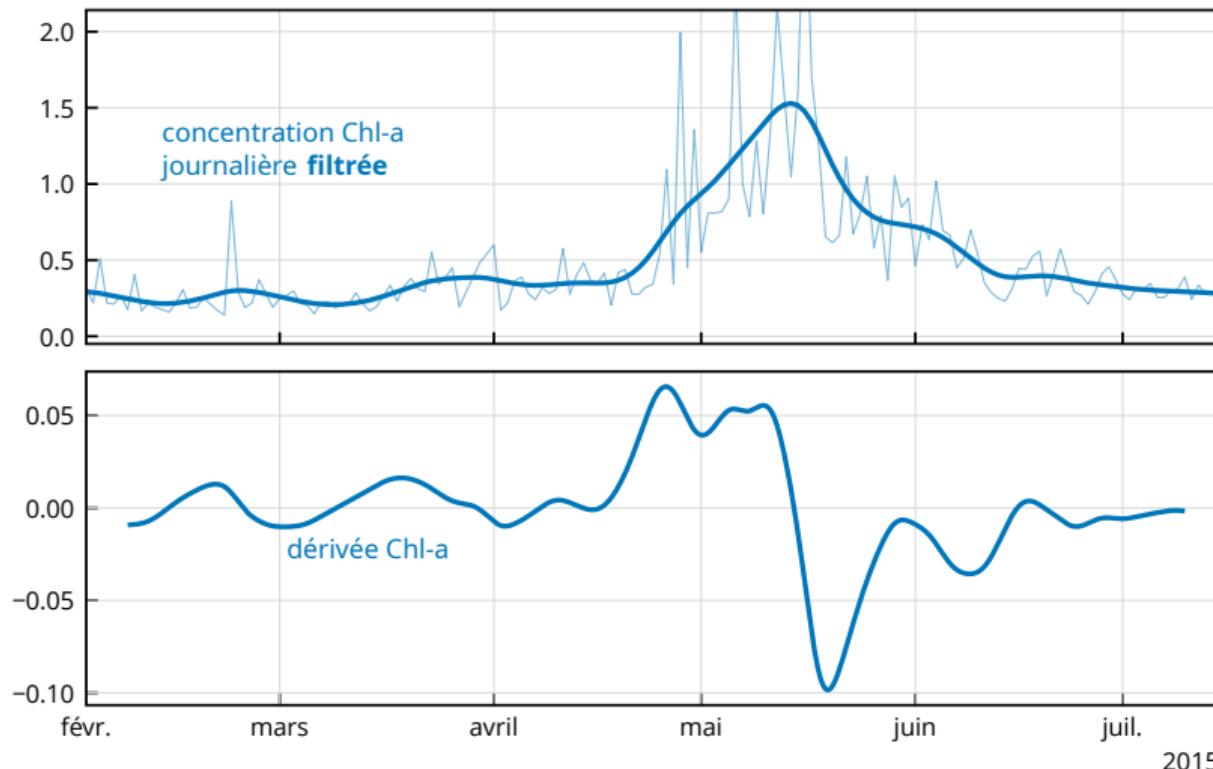
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



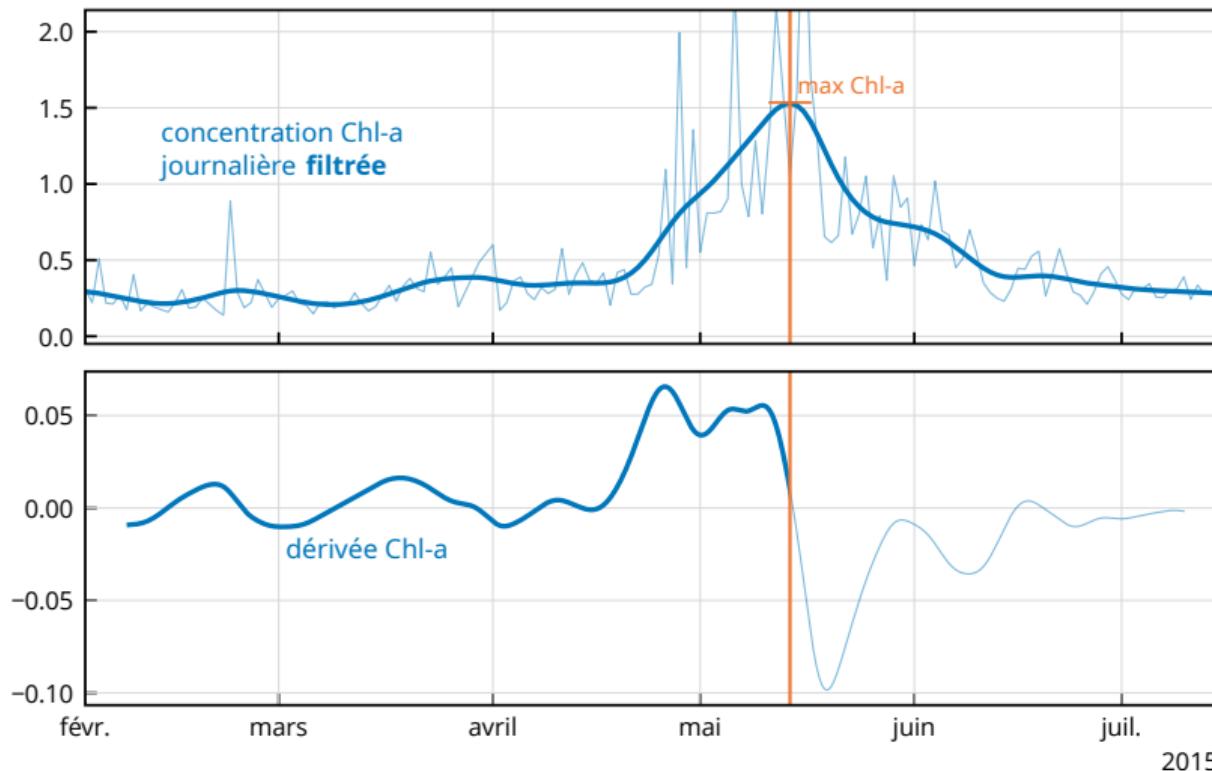
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



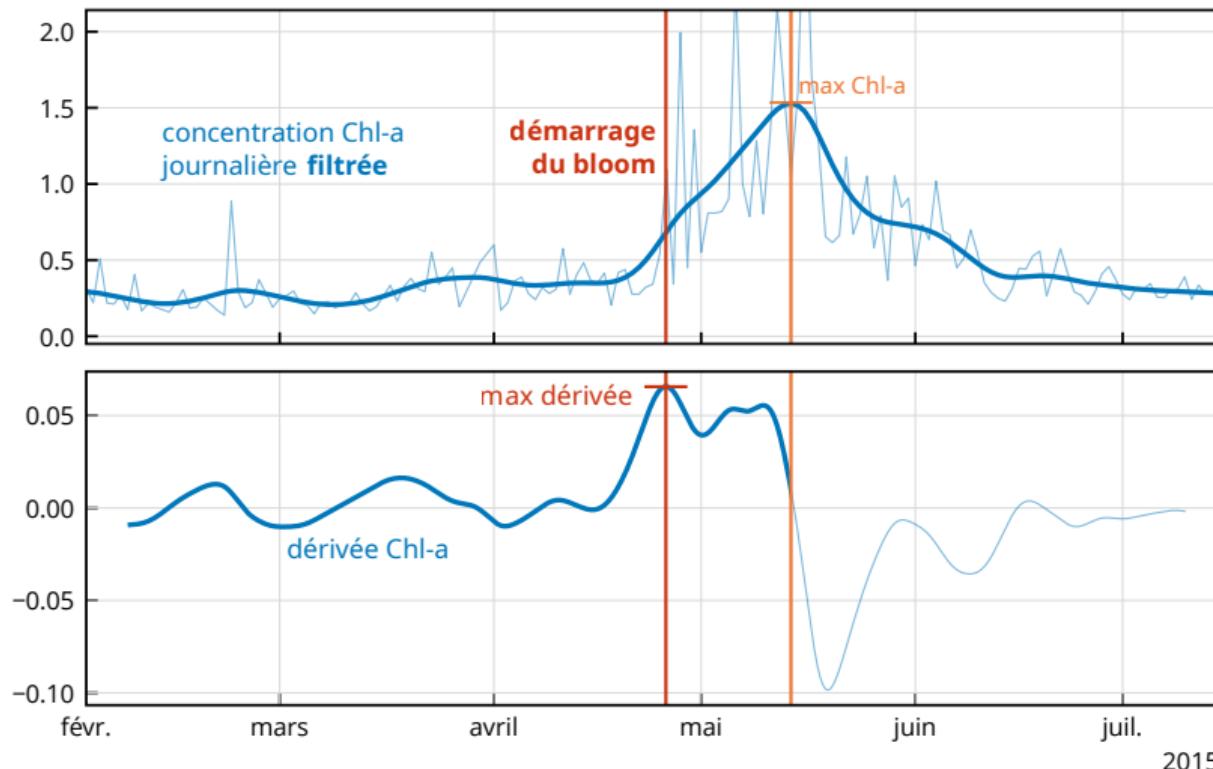
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



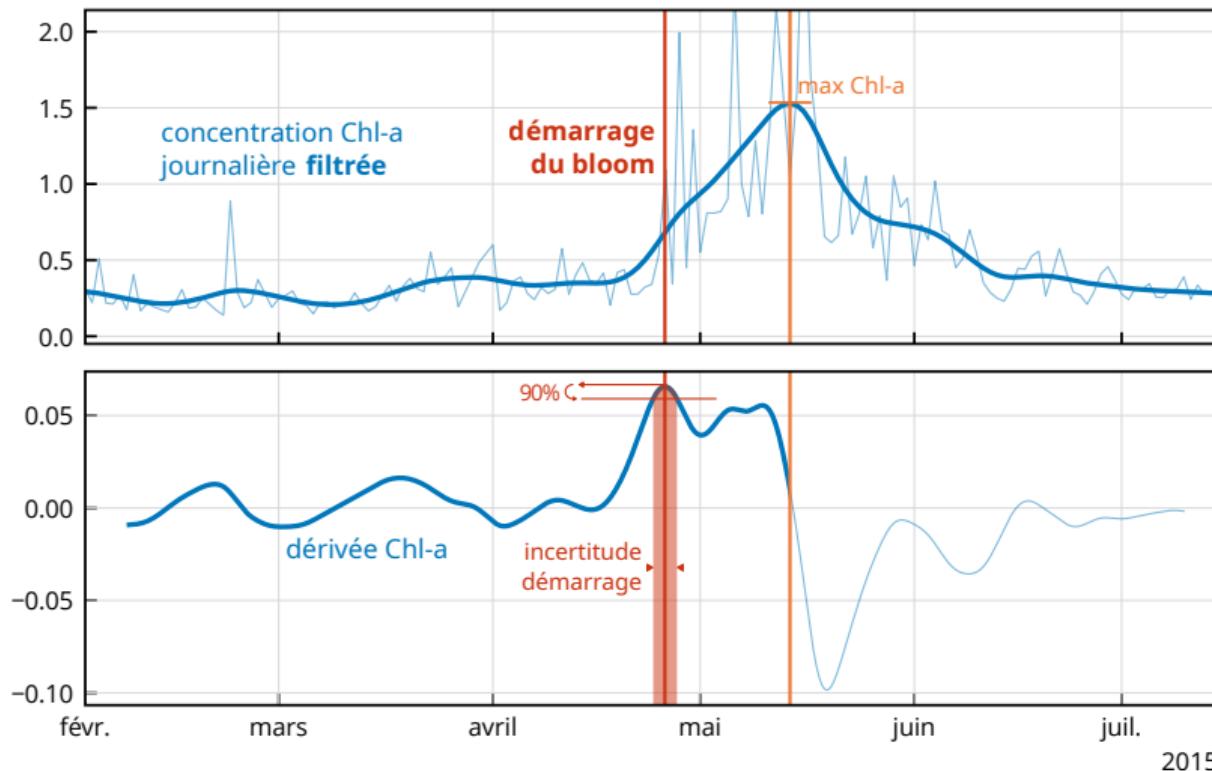
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



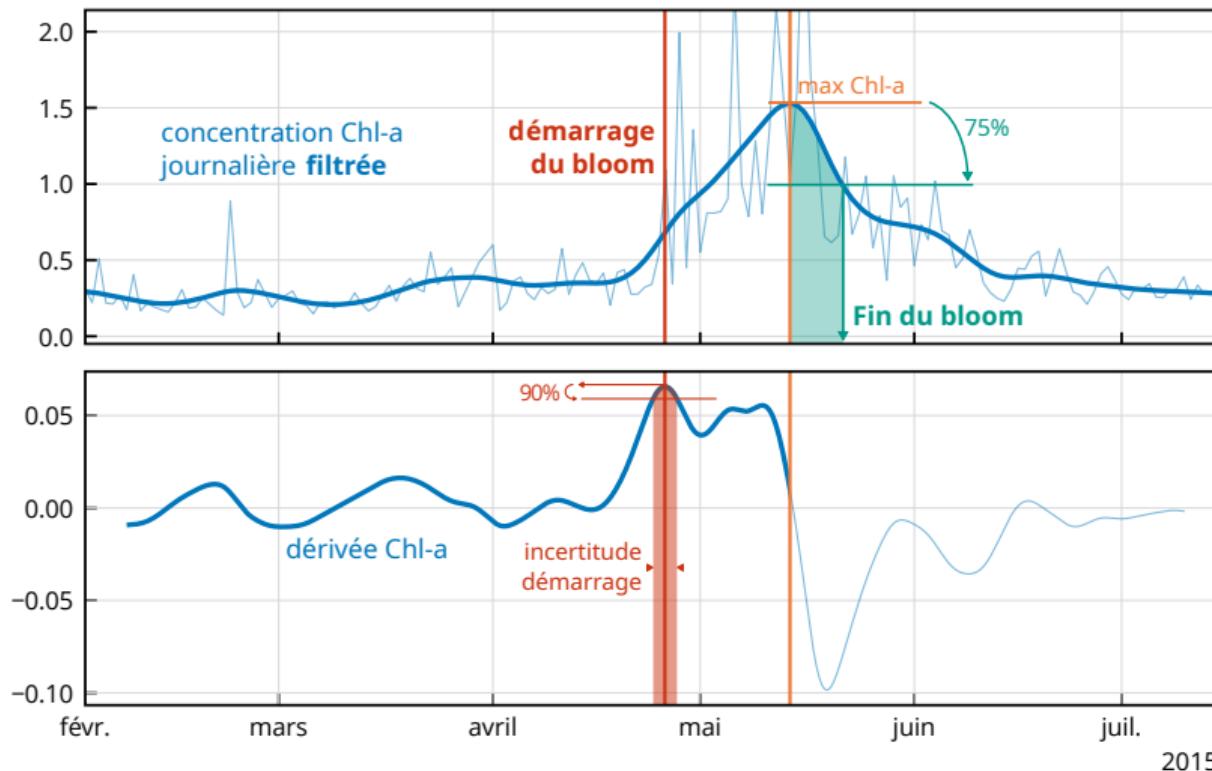
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



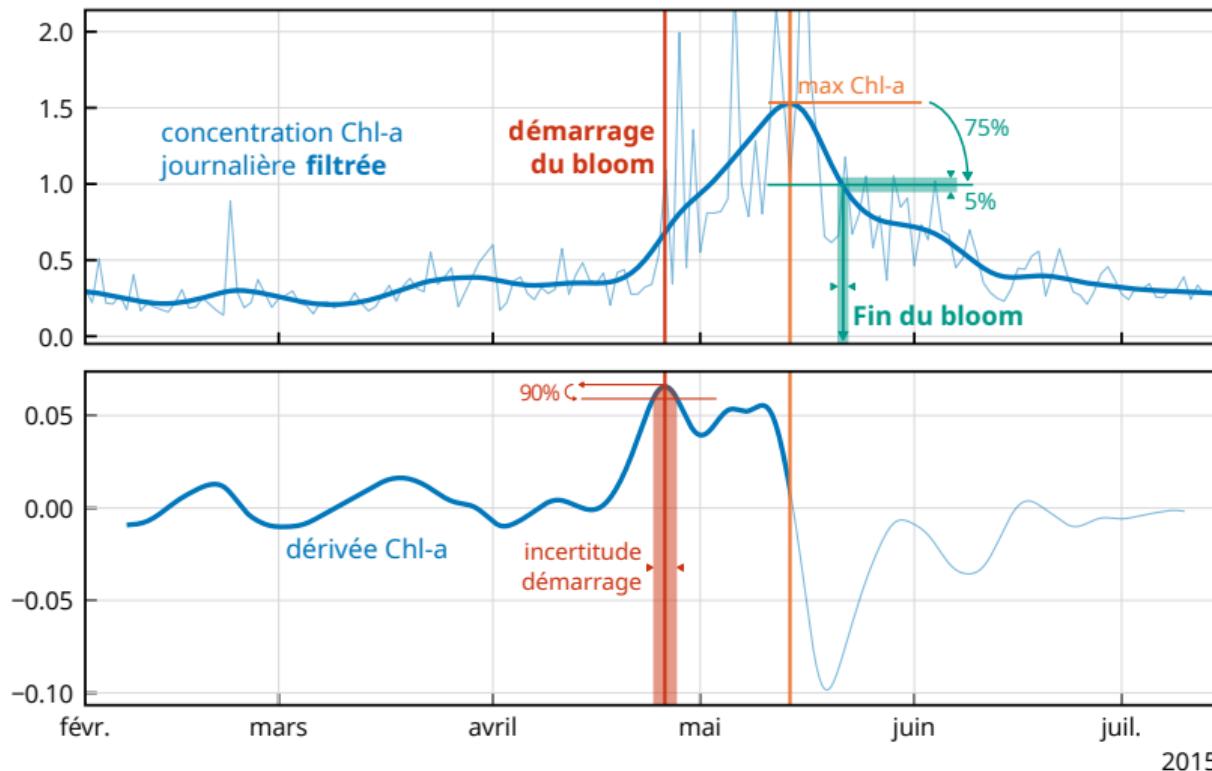
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



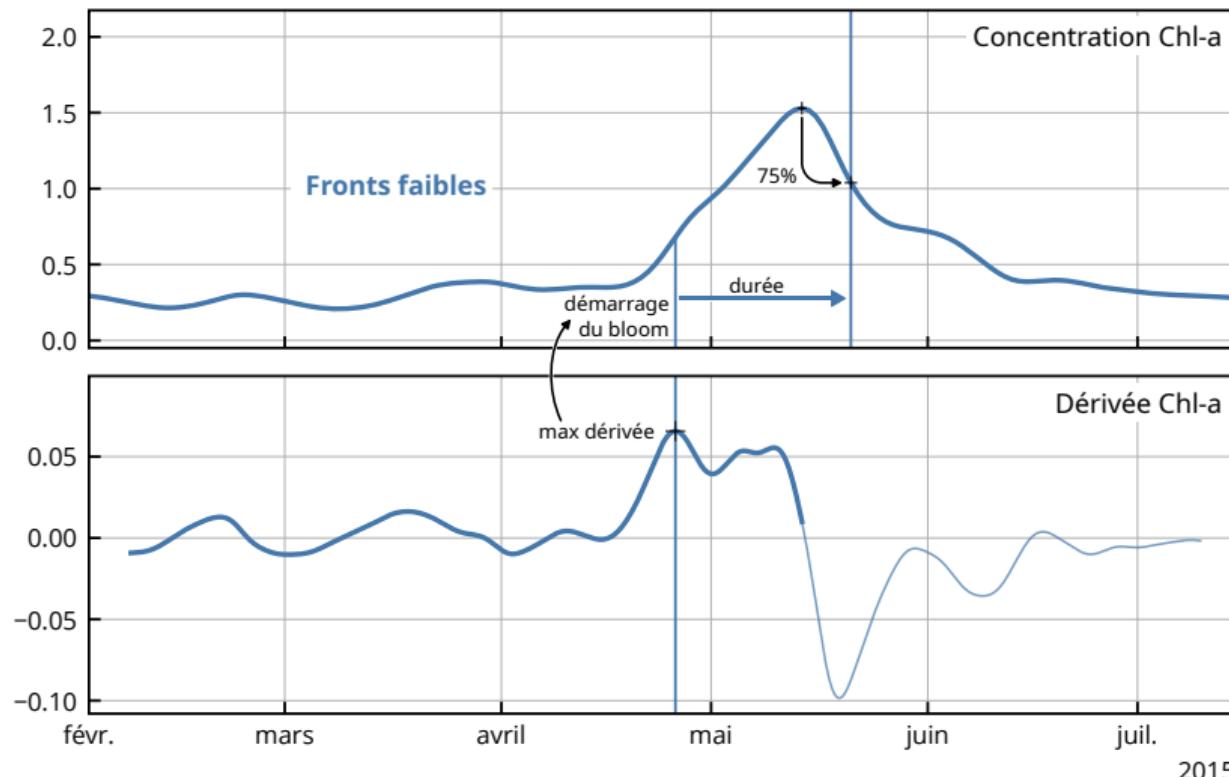
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



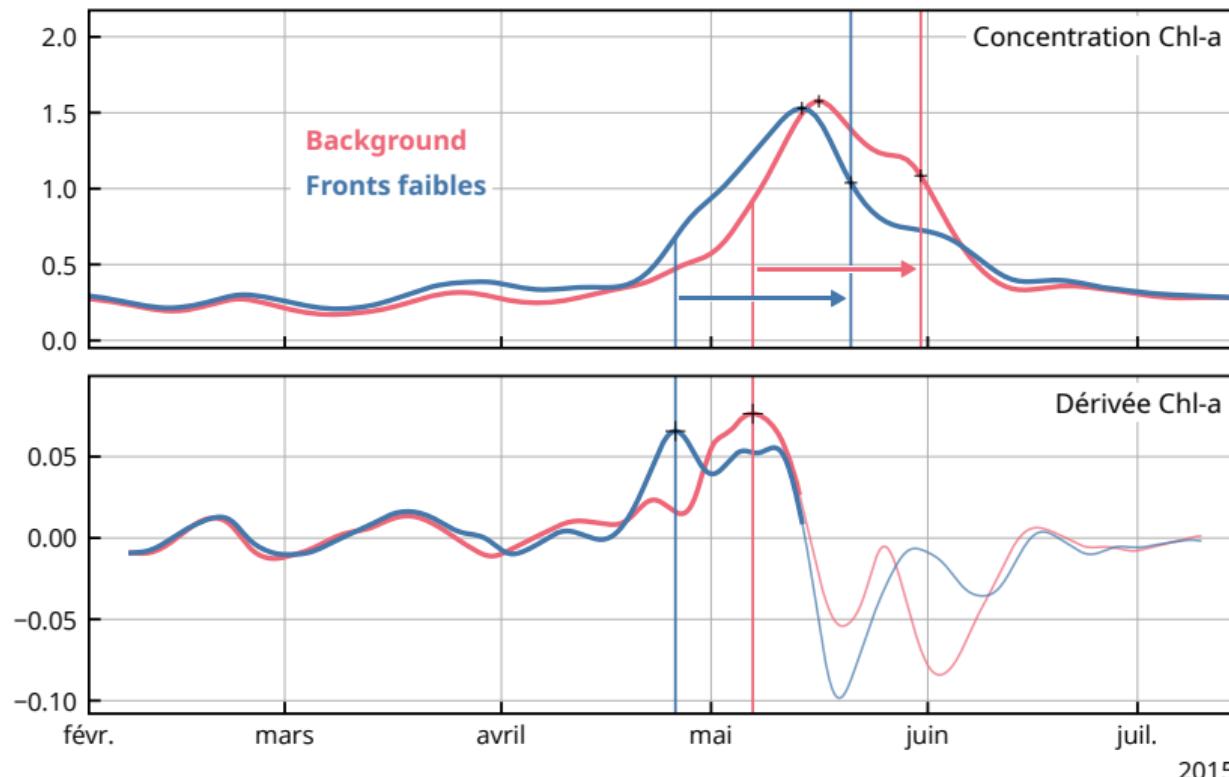
Chronométrer le bloom : démarrage et durée



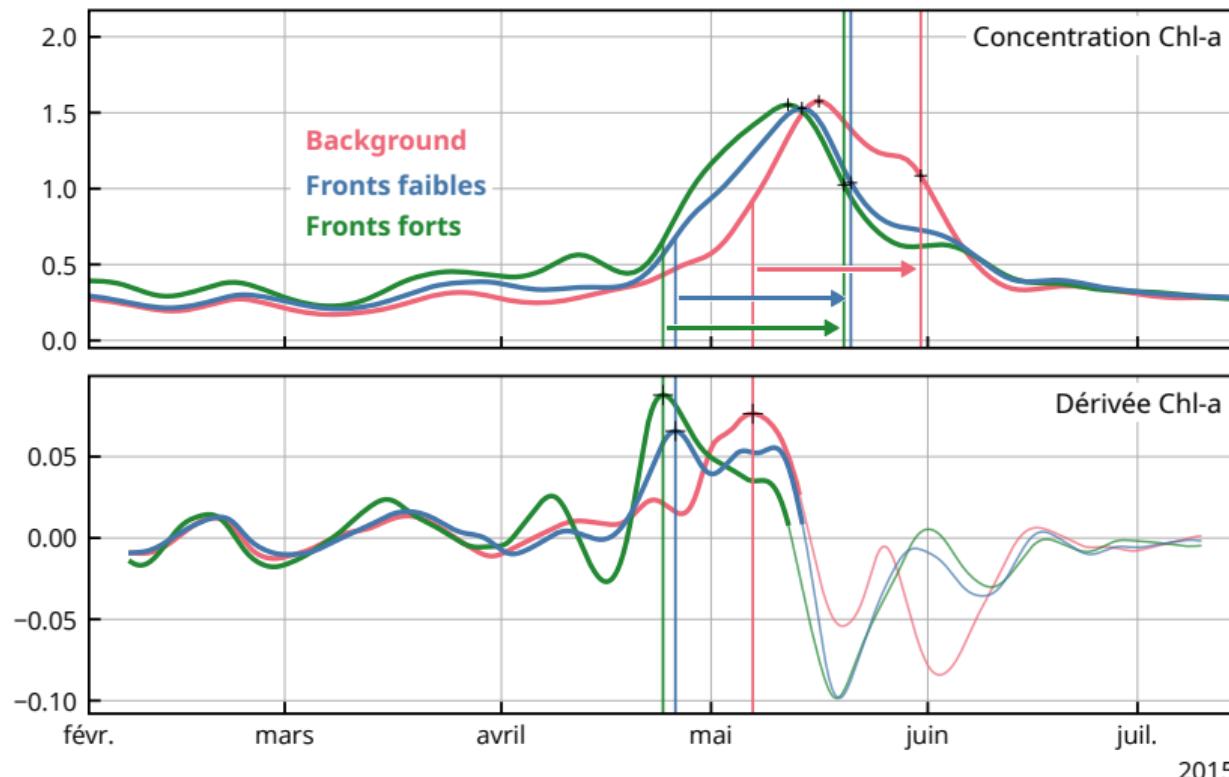
Différences de phénologie entre background et fronts



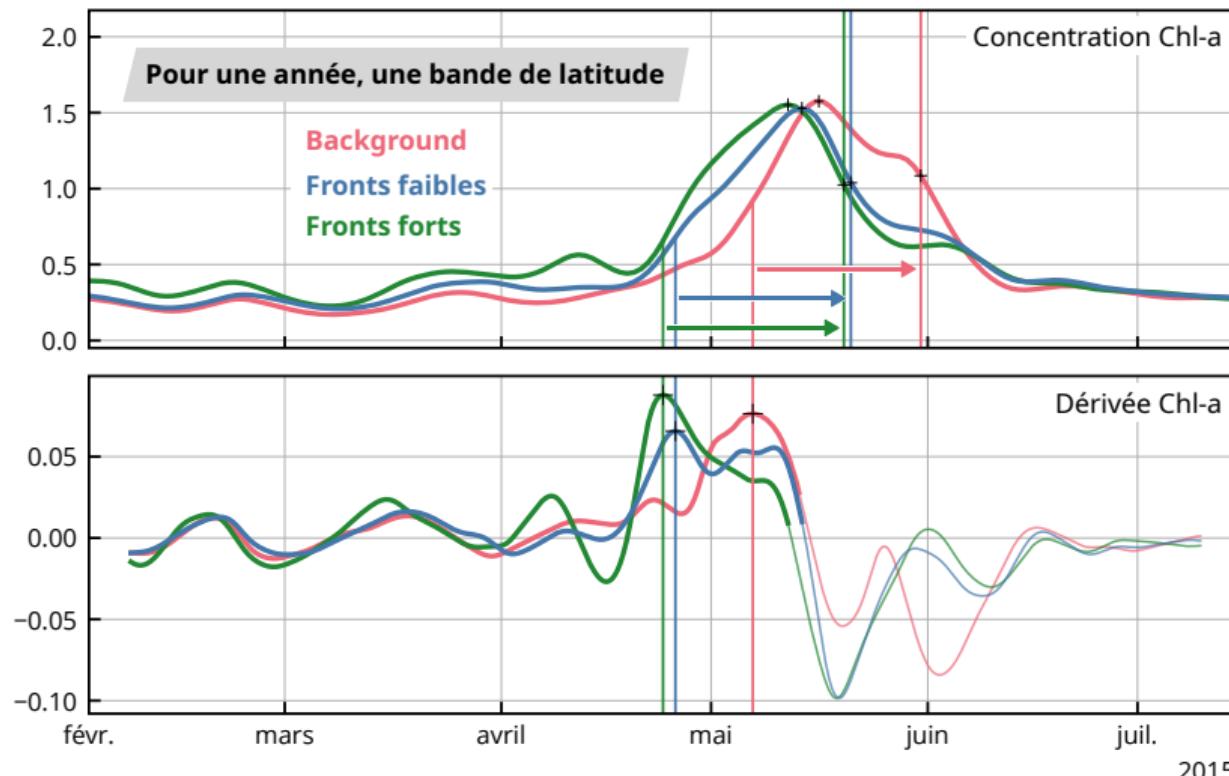
Différences de phénologie entre background et fronts



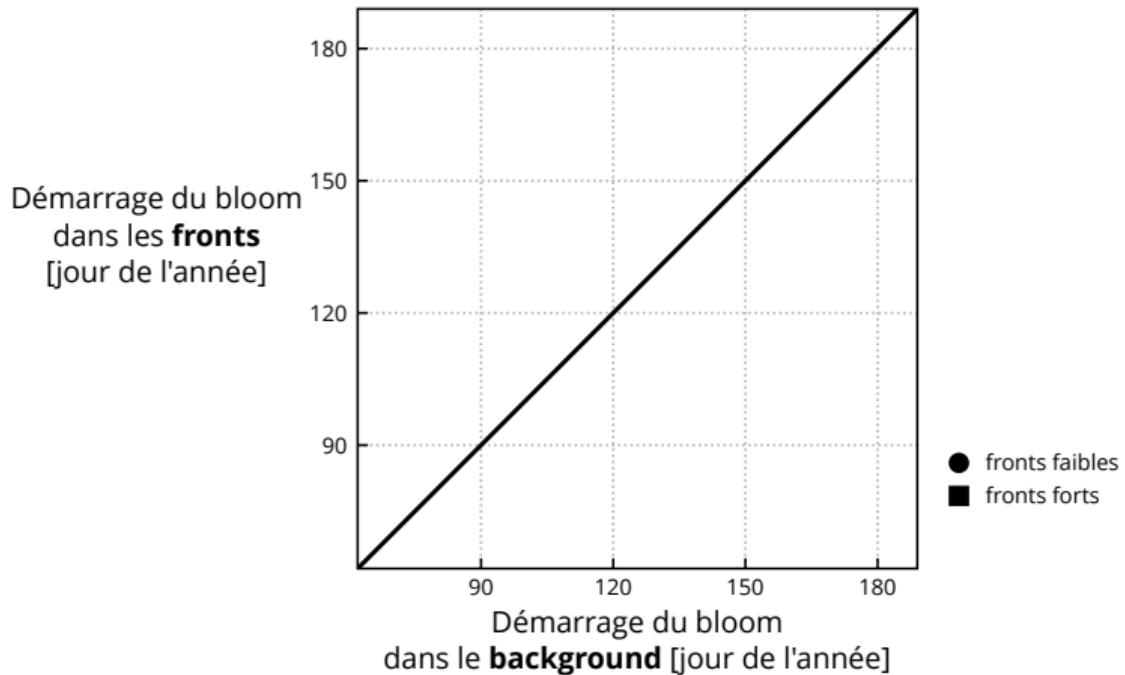
Différences de phénologie entre background et fronts



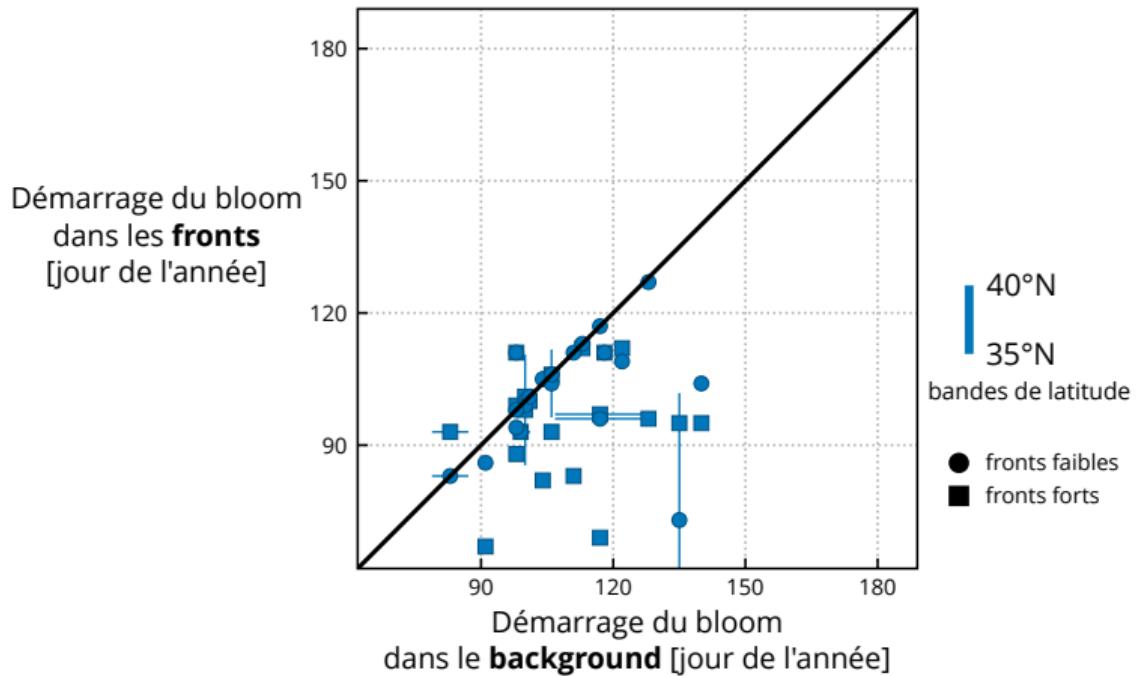
Différences de phénologie entre background et fronts



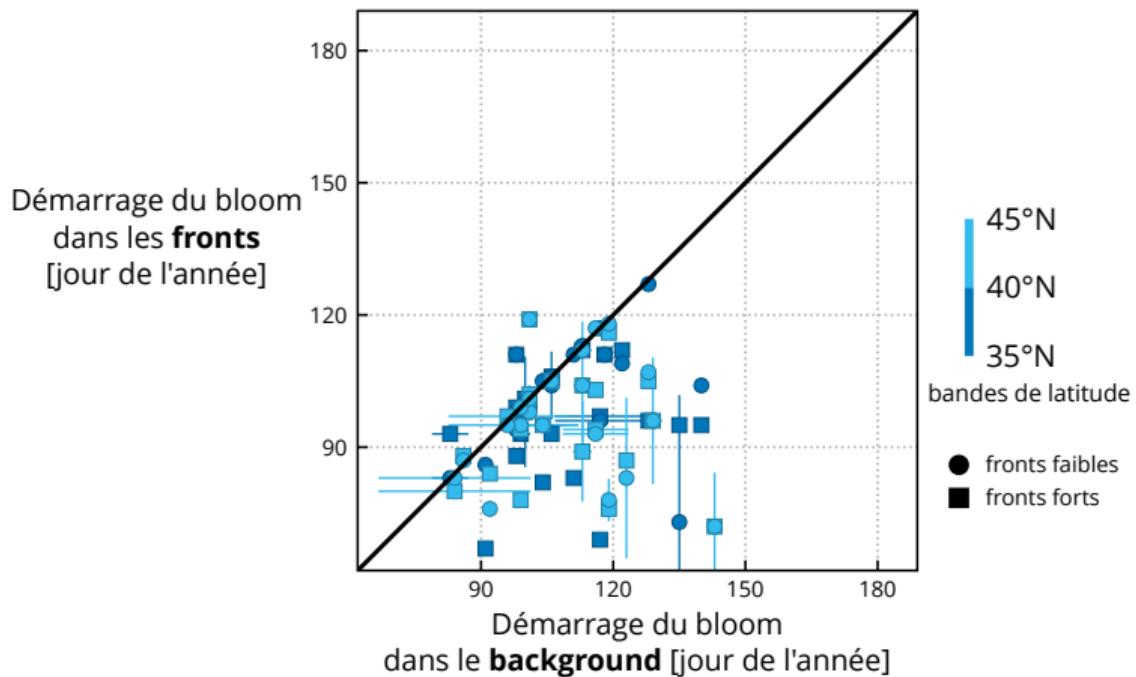
Décalage du *démarrage* du bloom



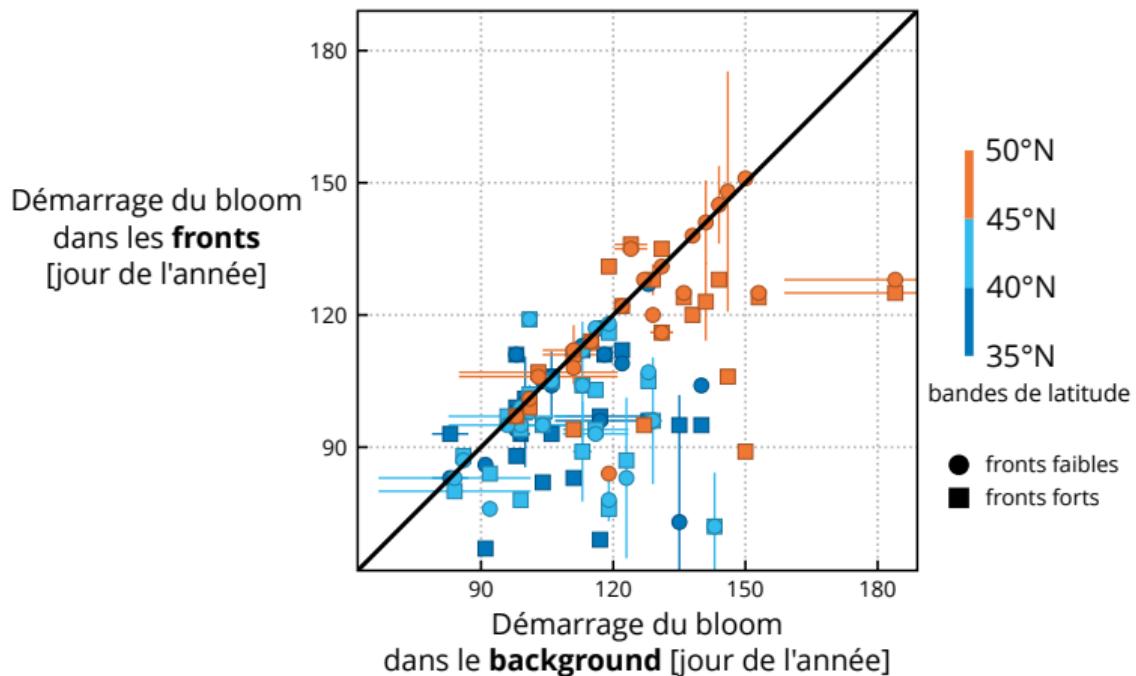
Décalage du *démarrage* du bloom



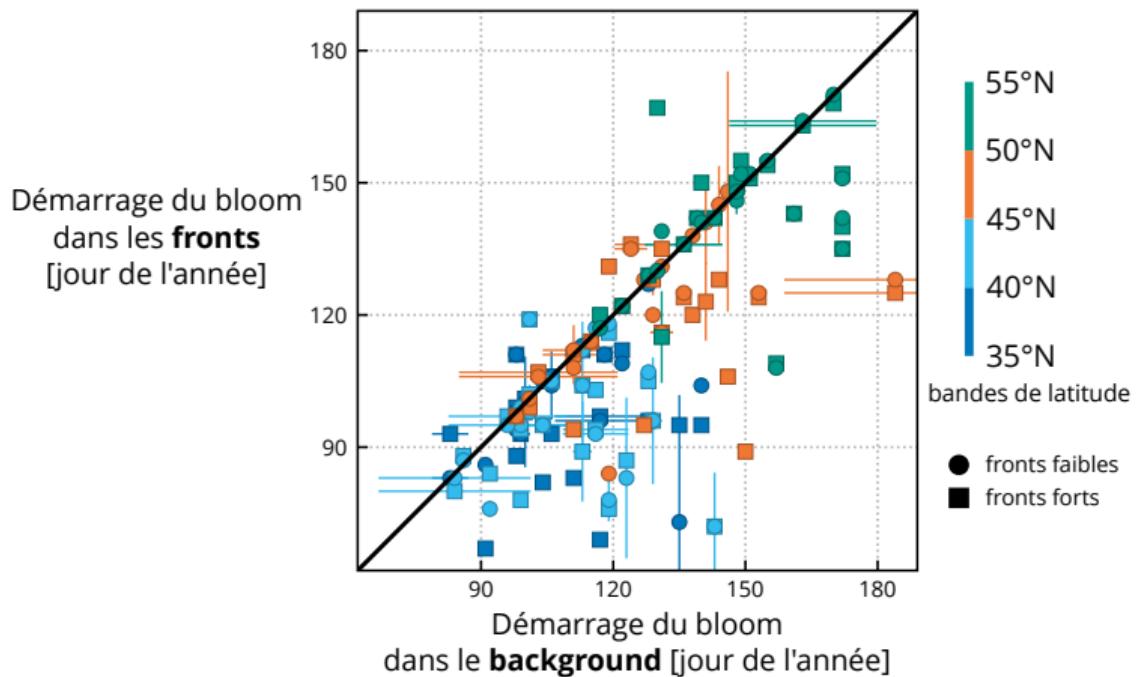
Décalage du *démarrage* du bloom



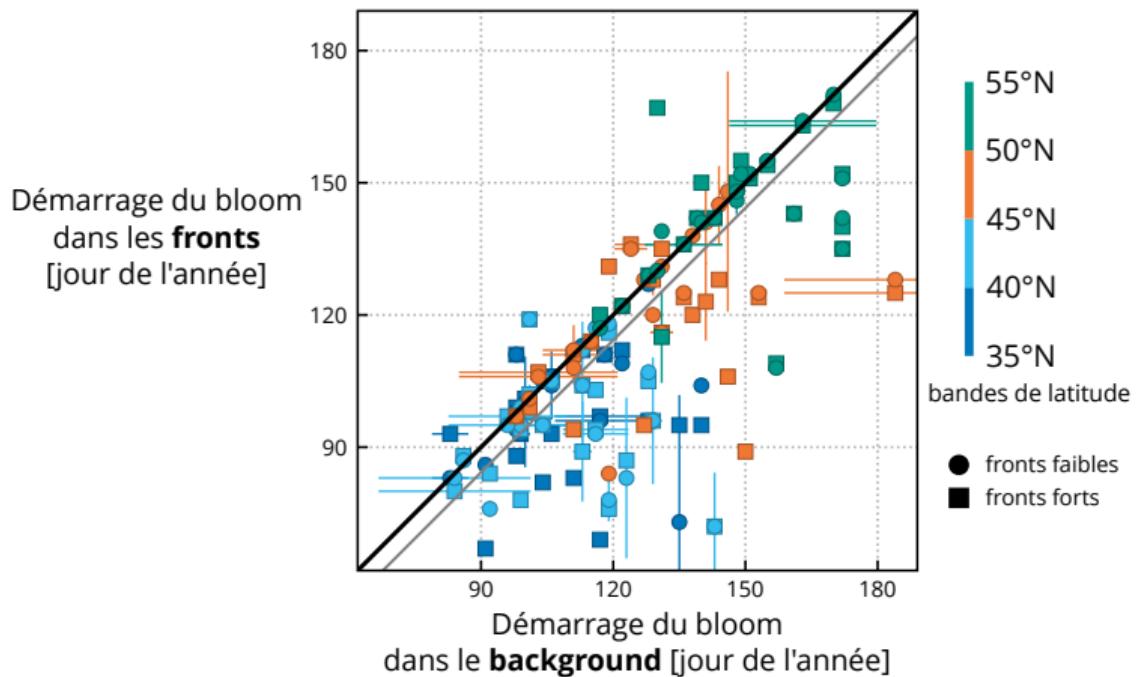
Décalage du *démarrage* du bloom



Décalage du *démarrage* du bloom

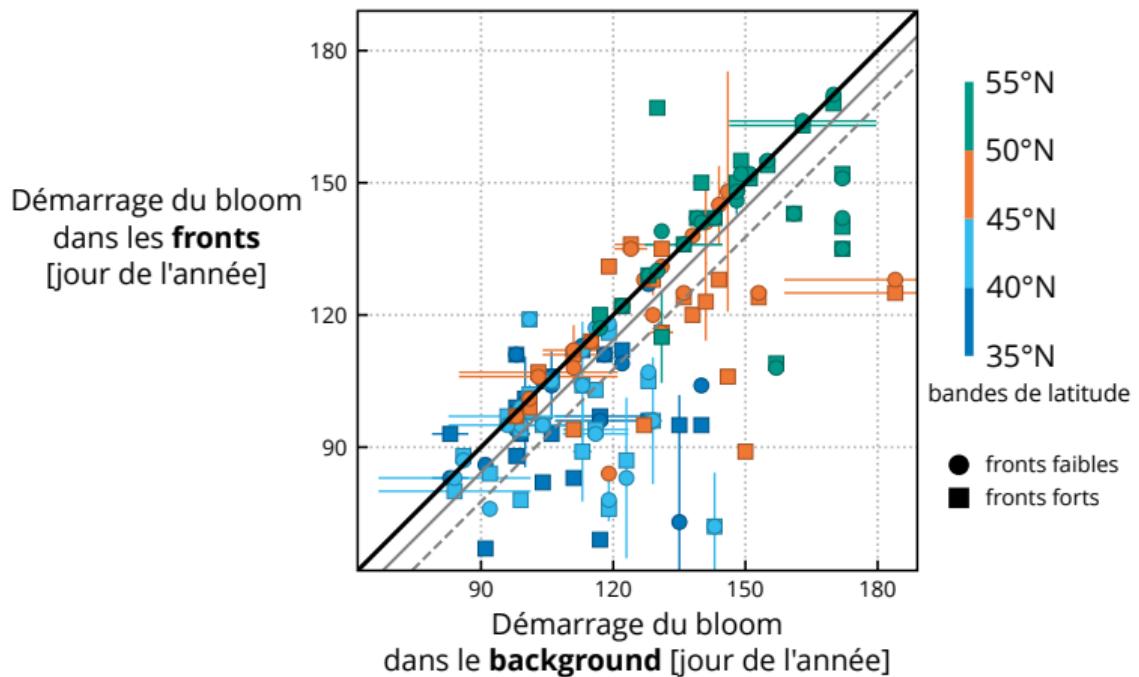


Décalage du *démarrage* du bloom



fit pour les fronts faibles : -6.7 ± 1.1 jours

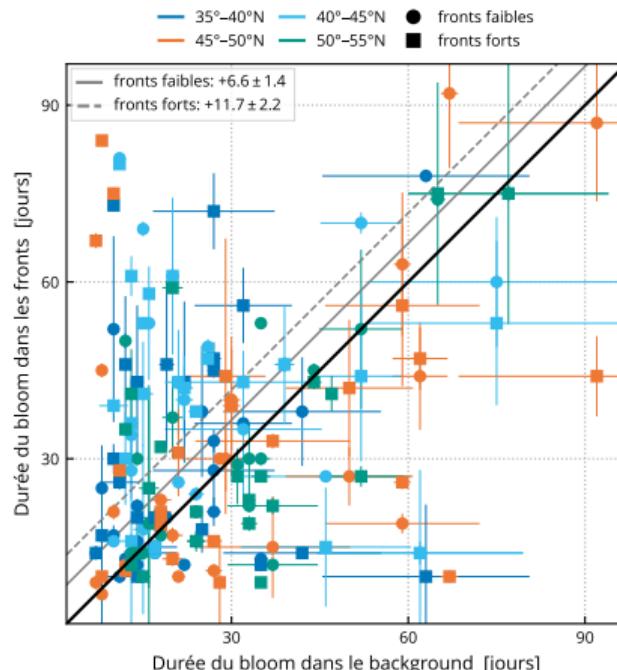
Décalage du *démarrage* du bloom



fit pour les fronts faibles : -6.7 ± 1.1 jours

fit pour les fronts forts : -13.5 ± 1.5 jours

Décalage de la *durée* du bloom



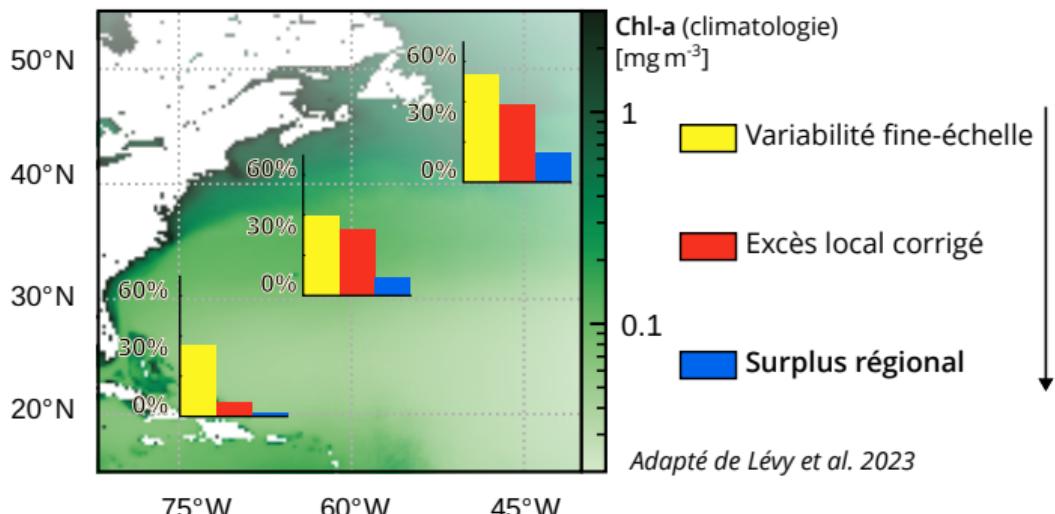
Blooms plus **longs** dans les **fronts**, mais moins significatif

Conclusion partie 3

- ▶ détection d'une avance du bloom dans les **fronts** d'une à deux semaines
 - effet des fronts sur la stratification
- ▶ pas d'effet significatif sur la durée du bloom

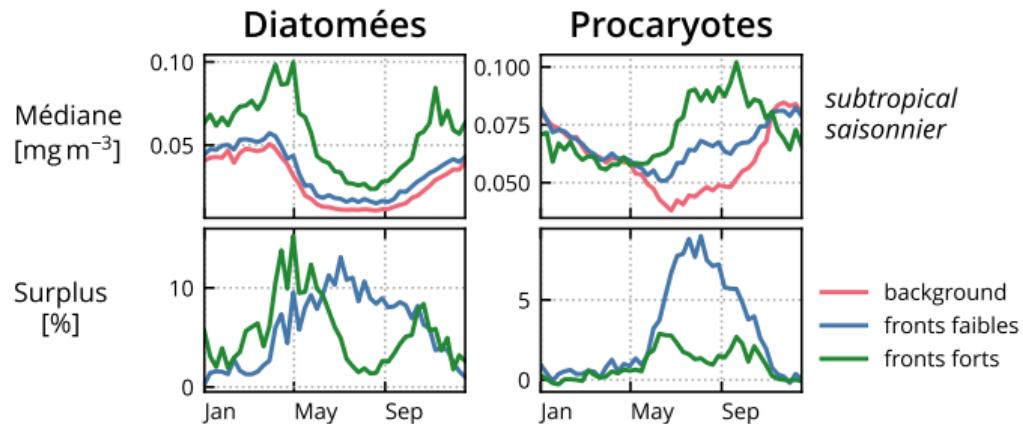
CONCLUSIONS

- ▶ Quantification à l'échelle régionale de l'effet des fines échelles
- ▶ Effet plus important dans la région subpolaire



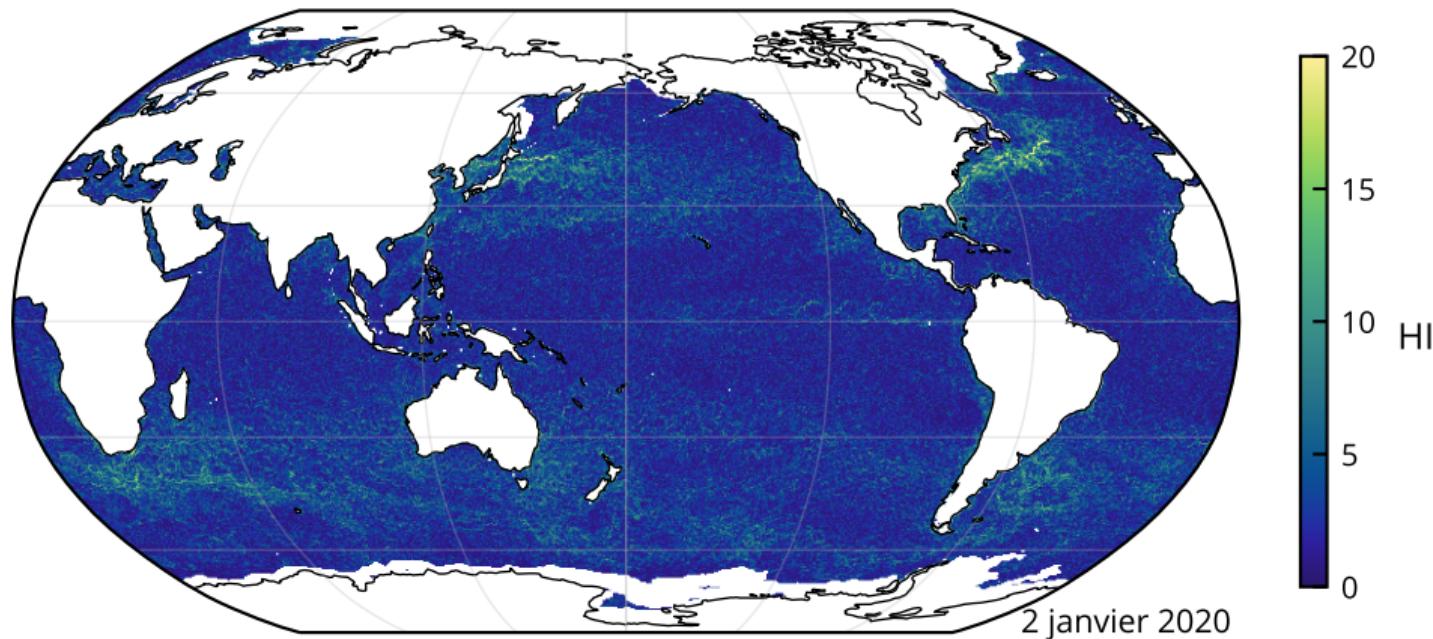
Perspectives : Application à la composition du phytoplancton

- ▶ cartes de concentration par groupe fonctionnel (PFT) obtenues par SOM (El Hourany et al. 2019)



→ réponse différente selon le groupe

Perspectives : Application à l'échelle globale



- ▶ difficultés techniques : cette image = 60 Mo
(20 ans = 0.5 To pour le HI seul)

Perspectives : outils pour la quantification des effets des fronts

- ▶ quantification haute résolution sur grande surface
- ⚡ analyses complexes, exploratoires / itératives
 - ⇒ nécessité d'outils adaptés

Perspectives : outils pour la quantification des effets des fronts

- ▶ quantification haute résolution sur grande surface
- ⚡ analyses complexes, exploratoires / itératives
 - ⇒ nécessité d'outils adaptés
- ▶ 11 000 lignes de codes + documentation
(<https://gitlab.in2p3.fr/clement.haeck/submeso-color>)
- ▶ packets python génériques : PyPi:filefinder, PyPi:tol-colors
- ▶ participation à PyPi:cf-xarray

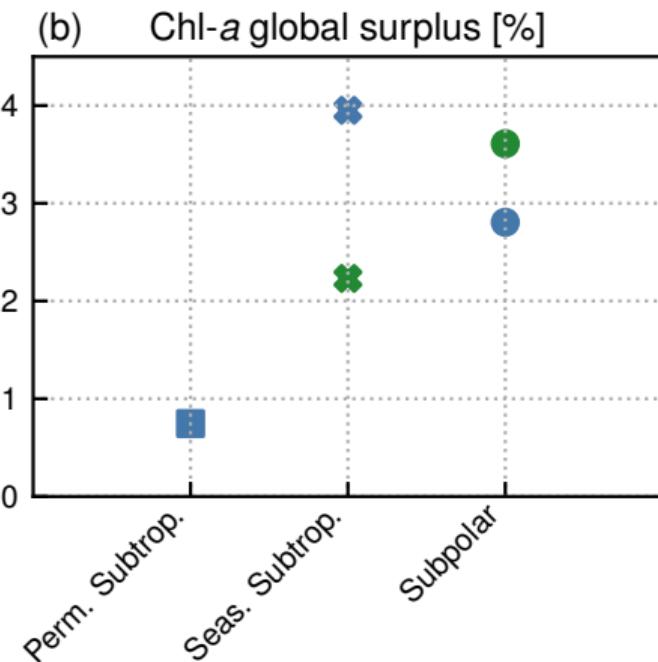
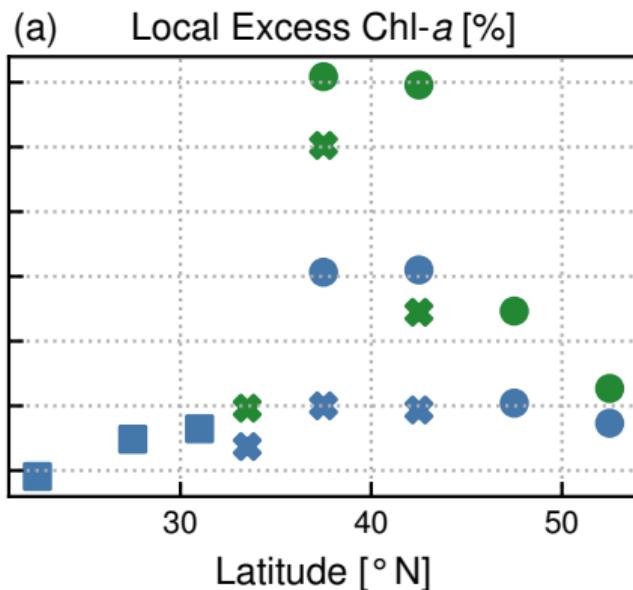
Perspectives : outils pour la quantification des effets des fronts

- ▶ quantification haute résolution sur grande surface
 - ⚡ analyses complexes, exploratoires / itératives
 - ⇒ nécessité d'outils adaptés
 - ▶ 11 000 lignes de codes + documentation
(<https://gitlab.in2p3.fr/clement.haeck/submeso-color>)
 - ▶ packets python génériques : PyPi:filefinder, PyPi:tol-colors
 - ▶ participation à PyPi:cf-xarray
- ⇒ Continuer à développer ces outils,
les rendre plus pratiques pour d'autres utilisateurs

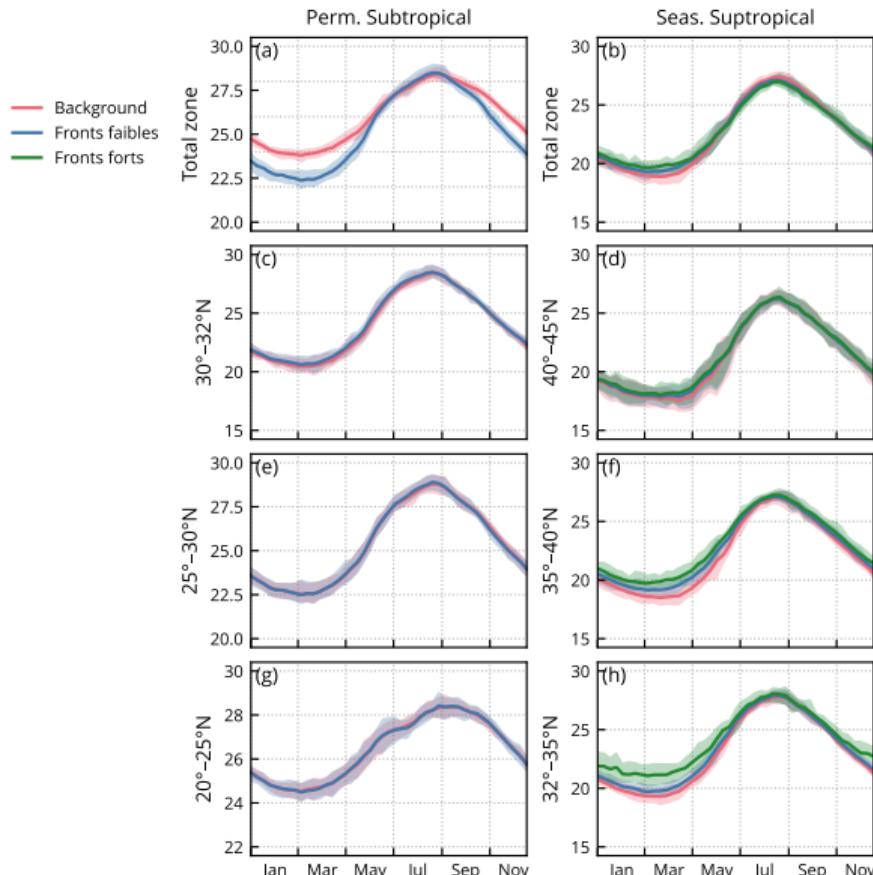
ANNEXES

Récapitulatif

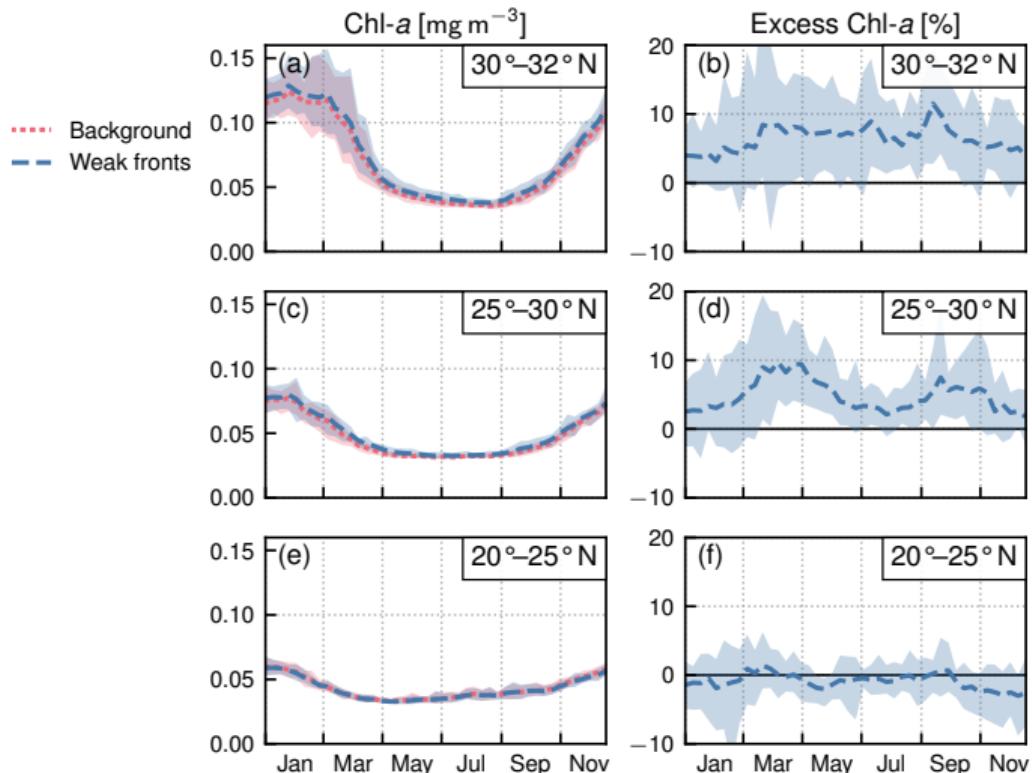
■ Perm. Subtrop. ♦ Seas. Subtrop. ● Subpolar ■ Weak fronts ■ Strong fronts



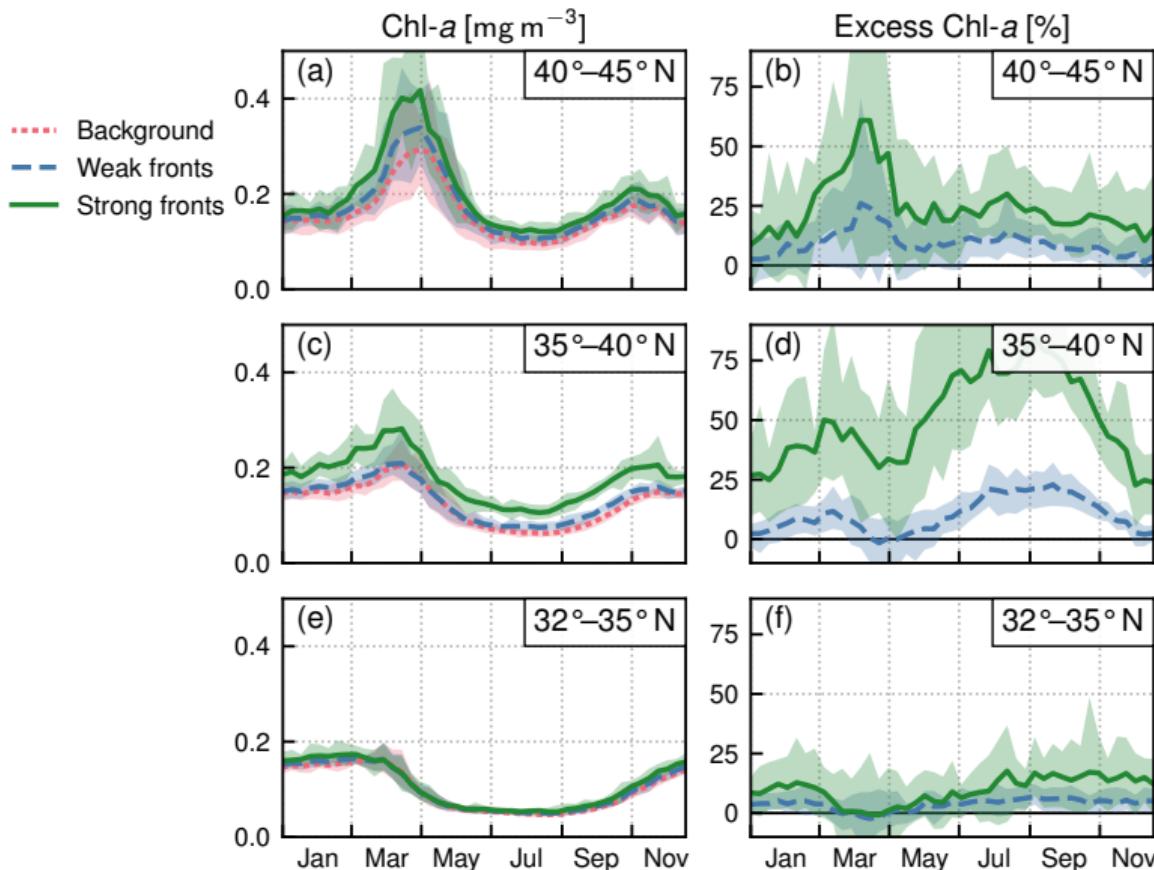
Climatologie de la médiane de SST



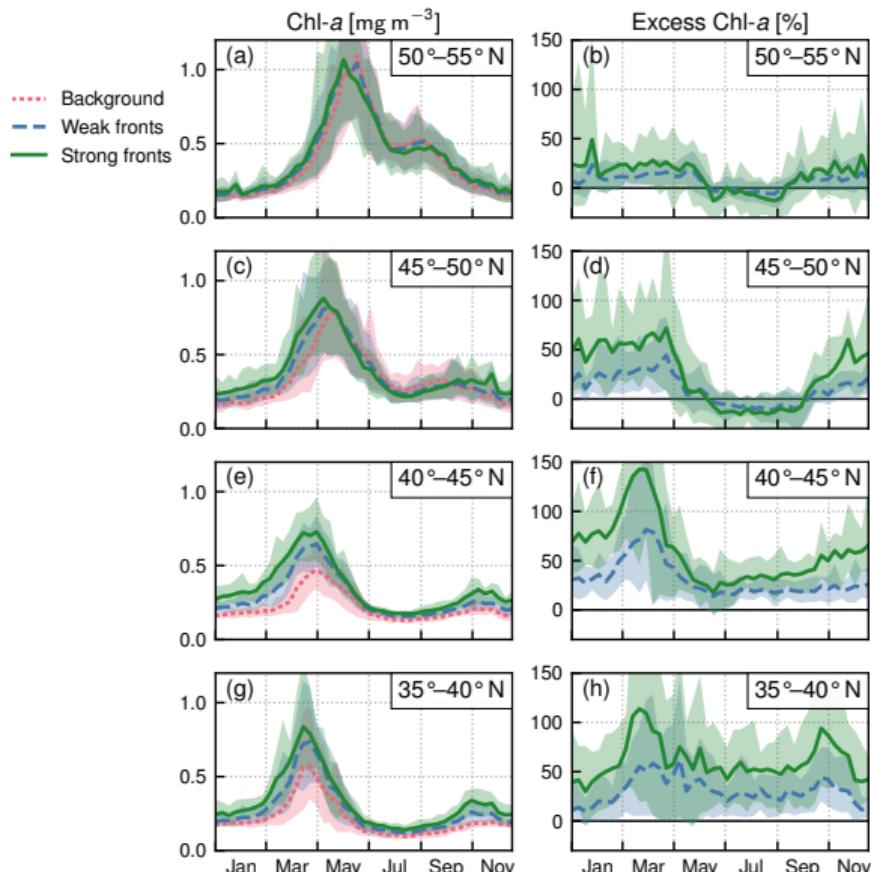
Climatologie de la médiane de Chl-a (Subtrop. perm.)



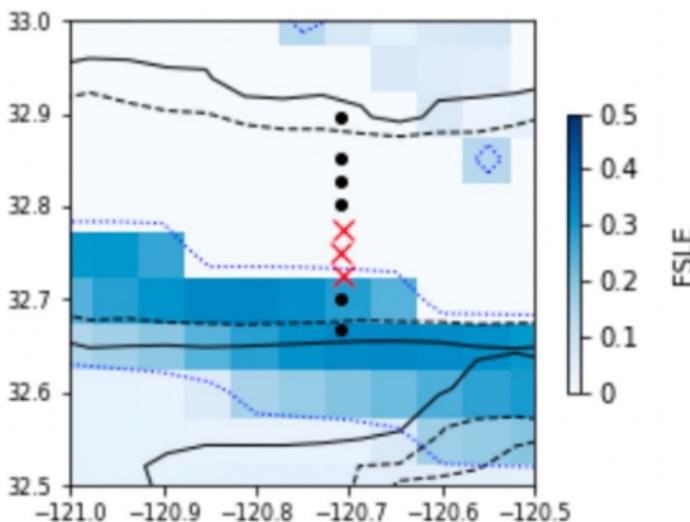
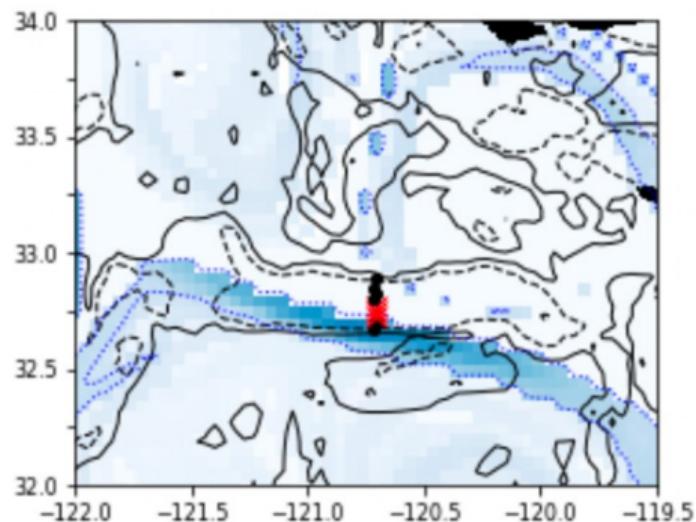
Climatologie de la médiane de Chl-a (Subtrop. sais.)



Climatologie de la médiane de Chl-a (Subpolaire)

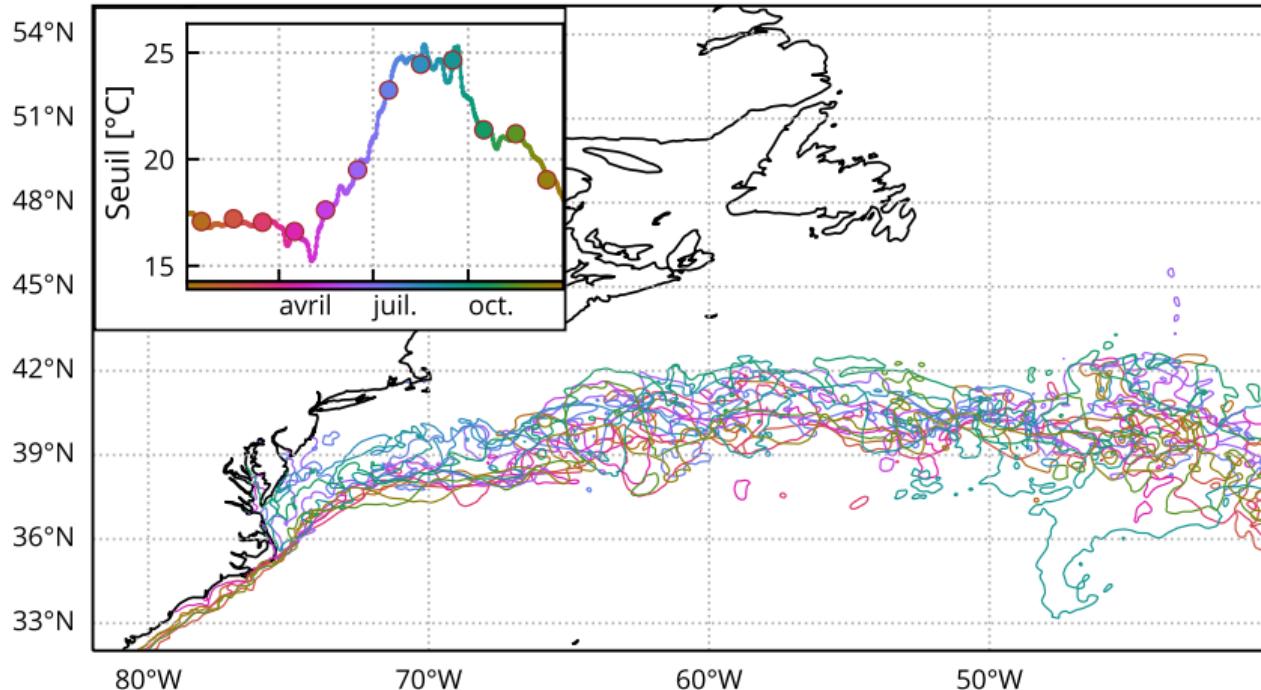


Comparaison entre fronts détectés in-situ, par HI, ou par FSLE

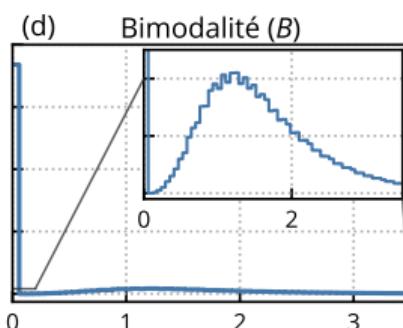
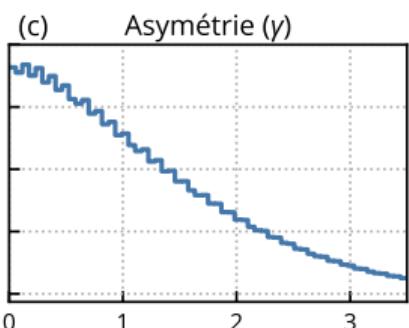
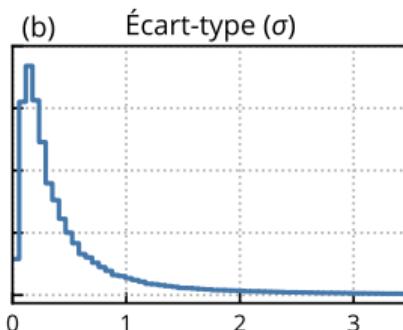
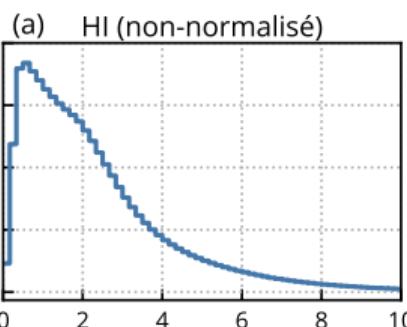


Variation temporelle de la délimitation des biomes

Position de la séparation le 15 de chaque mois pour l'année 2007

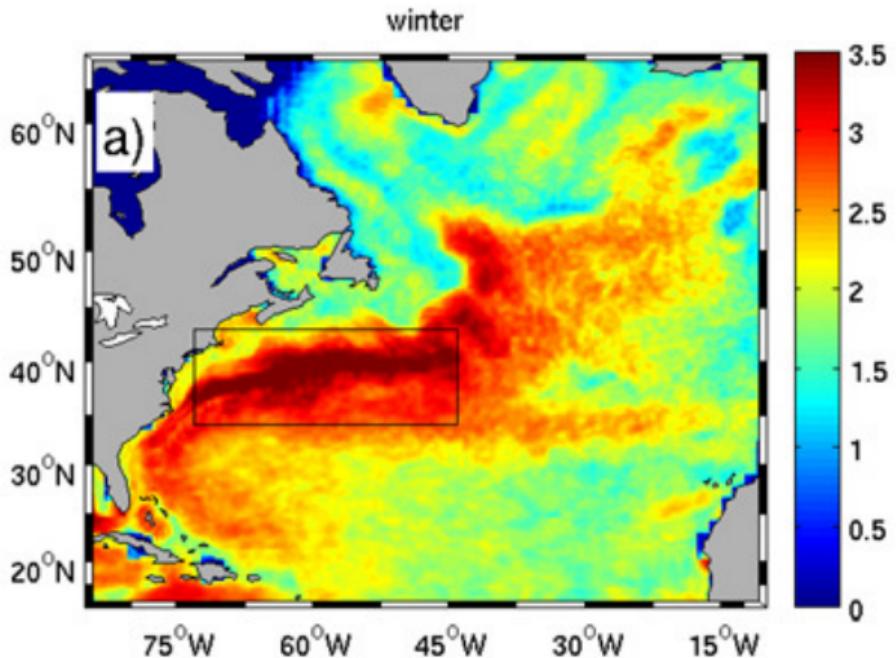


Distribution des valeurs de HI



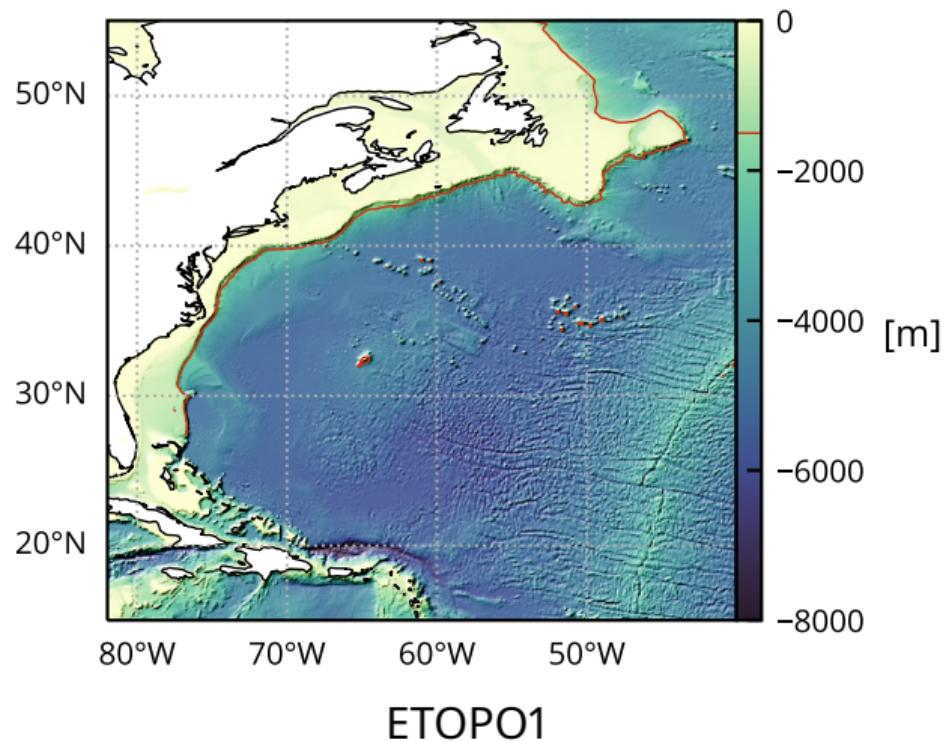
pour l'année 2007

EKE dans la région du Gulf Stream

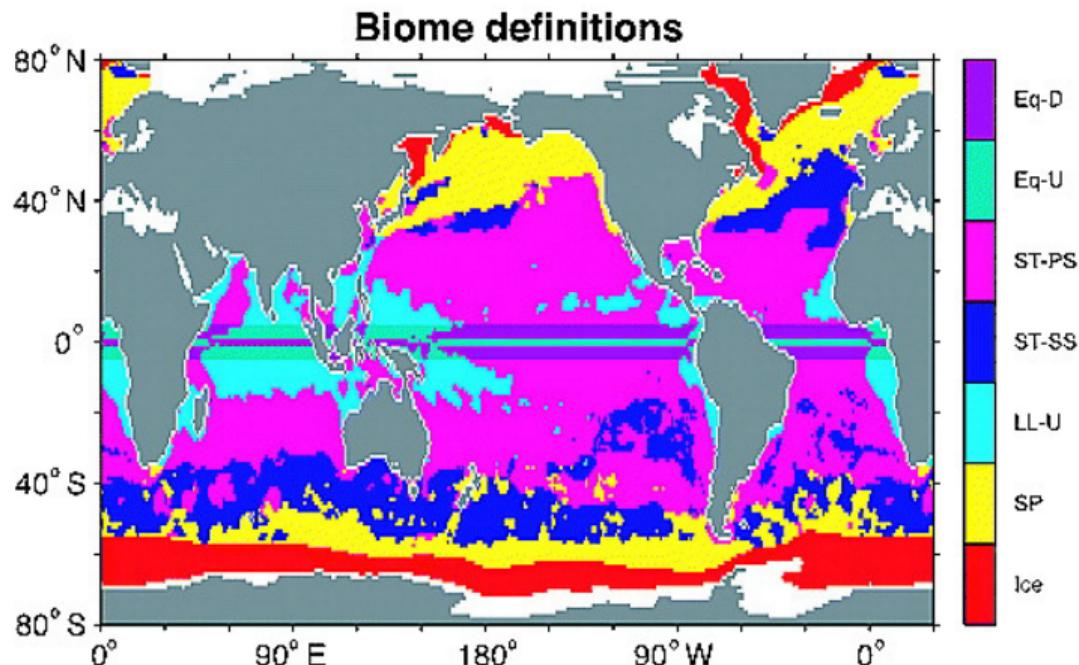


Zhai et al. 2008, fig. 1

Bathymétrie



Délimitations de biomes



Sarmiento et al. 2004, fig. 2b