

Changements récents de la biomasse océanique
révélés par les observations satellitaires de la
« couleur de l'océan »

David ANTOINE

CNRS, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Changements récents de la **biomasse océanique**
révélés par les **observations satellitaires** de la
« **couleur de l'océan** »

biomasse océanique

« **couleur de l'océan** »

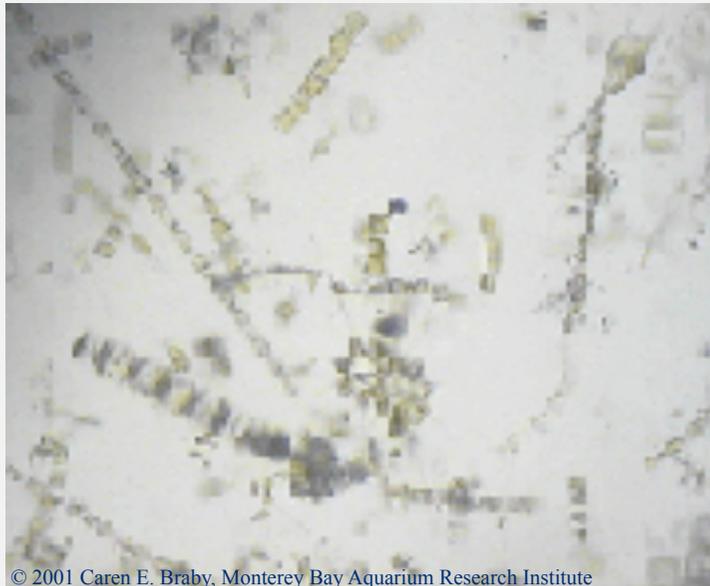
observations satellitaires

Lien avec les changements climatiques

La biomasse végétale océanique



Credit: Wim Van Egmond, Visuals Unlimited / Science Photo Library



© 2001 Caren E. Braby, Monterey Bay Aquarium Research Institute



Crédit photo: M. Montresor, SZN / Alfred Wegener Institute

La biomasse végétale océanique

- Phytoplancton: organismes microscopiques (0.5 μm \rightarrow 200 μm); Extrême biodiversité: 12 taxa (procaryotes, eucaryotes, différentes pigmentations et fonctions géochimiques incluant photosynthèse mais aussi d'autres voies métaboliques etc...)
- Le « stock » de phytoplancton est d'environ 1 Giga tonne C (\sim 500 pour la biomasse Terrestre)
- Il produit par contre \sim 50-60 Giga tonnes de carbone par an, ce qui est autant que pour la biomasse Terrestre (Longhurst et al., 1995; Antoine et al., 1996; Behrenfeld and Falkowski, 1997; Behrenfeld et al., 2005; Carr et al., 2006). C'est la « production primaire »
- Environ 20% de ce carbone serait « exporté » vers les couches plus profondes de l'océan, donc \sim 10 Giga tonnes C
- Cette activité biologique contribue au puits océanique de carbone, qui prélève environ $\frac{1}{4}$ du CO_2 rejeté par l'homme dans l'atmosphère (un autre quart par la végétation Terrestre, et la moitié restant dans l'atmosphère)
- Un océan sans cette activité biologique aurait une « pression partielle de CO_2 » de \sim 450-500 ppm, ce qui est beaucoup plus qu'actuellement

La « pompe biologique » de CO_2

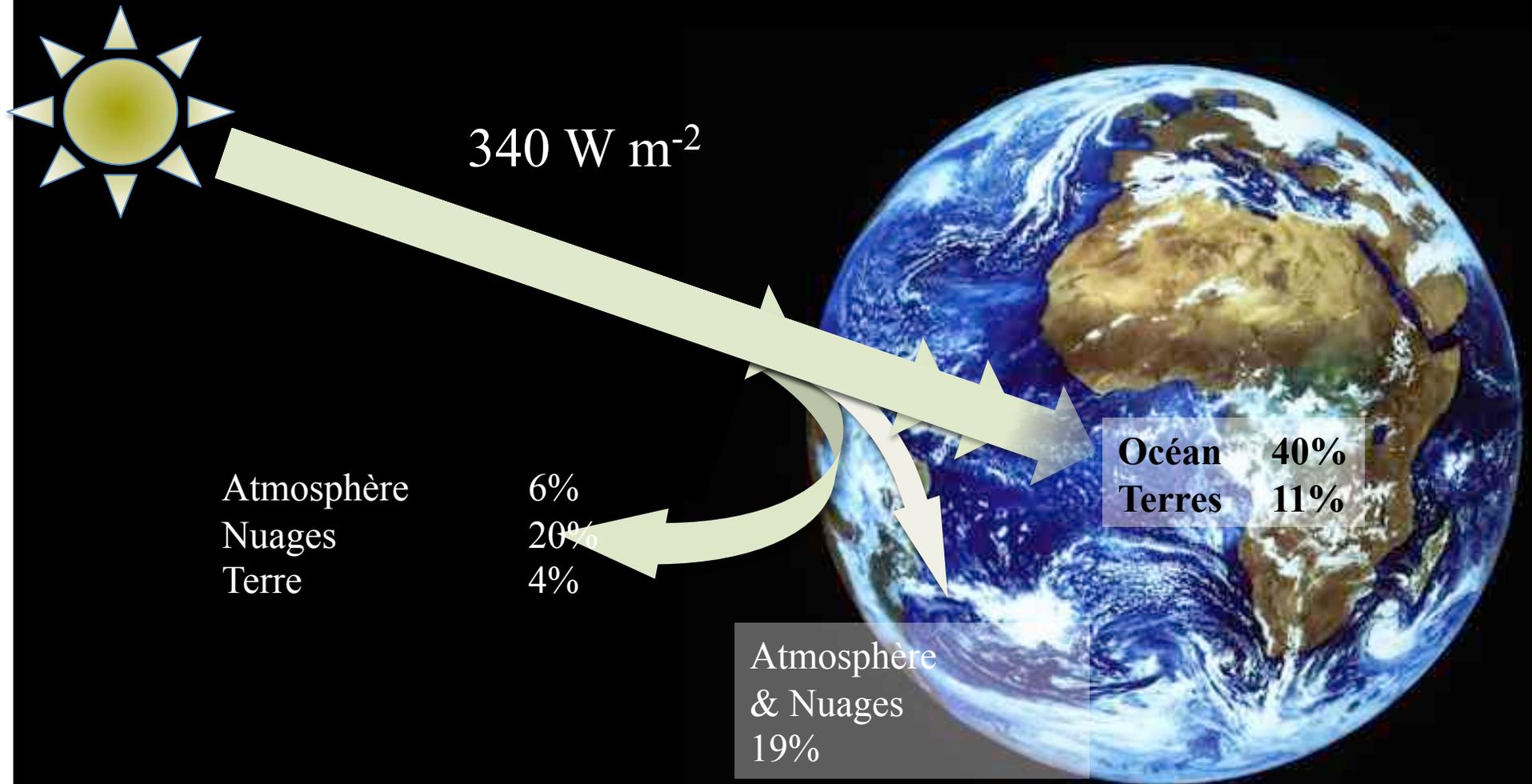
La concentration en chlorophylle (Chl) comme indicateur de la biomasse végétale océanique

- C'est le pigment présent dans toutes les espèces de phytoplancton (photosynthèse)
- Les changements de l'activité biologique ont un impact sur Chl
- Elle est mesurée depuis des décennies dans l'océan mondial
- Ses variations de concentration sont reliées à celles de la biomasse du phytoplancton dans les eaux du large (95% de l'océan), via leur impact sur la « couleur de l'océan »
- Sa concentration est maintenant fournie à échelle globale et répétée par les observations satellitaires

La « couleur de l'océan »

La technique qui permet la quantification de la biomasse
phytoplanctonique

Bilan radiatif de la Terre



Destin des photons dans l'océan

Ils interagissent avec:

- L'eau de mer pure
- Matière organique dissoute colorée

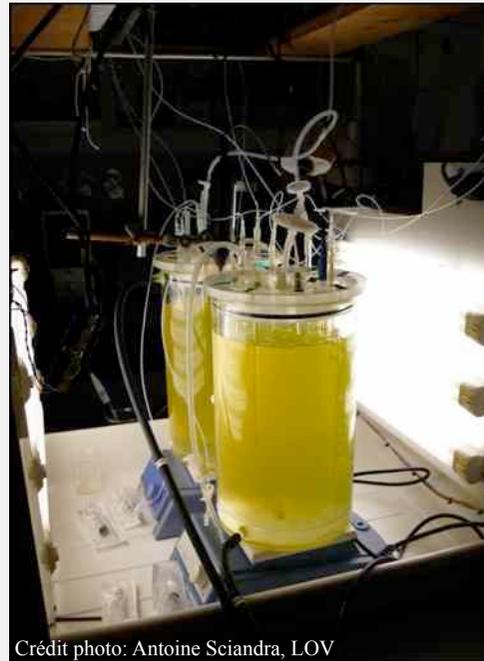
Destin des photons dans l'océan

Ils interagissent avec:

- L'eau de mer pure
- Matière organique dissoute colorée
- Des particules:
 - Le phytoplancton



Crédit photo: Thanassis Moschou. Malawi Cichlid Homepage © 1999-2006



Crédit photo: Antoine Sciandra, LOV



Crédit photo: Antoine Sciandra, LOV



Crédit photo: M. Montresor, SZN / Alfred Wegener Institute

Destin des photons dans l'océan

Ils interagissent avec:

- L'eau de mer
- Matière organique dissoute colorée
- Des particules:
 - Le phytoplancton
 - Autres...

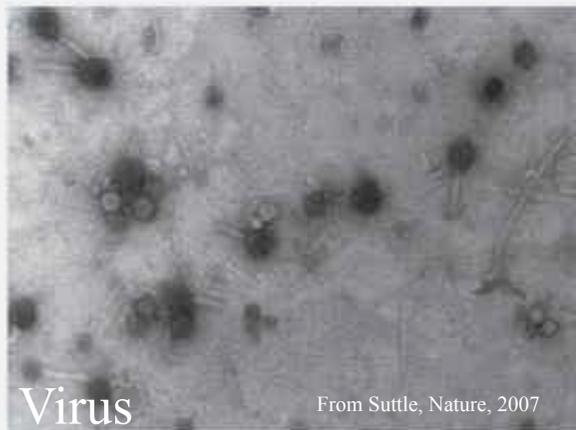
Particules dans L'océan



Lost at Sea: Where Is All the Plastic?

Richard C. Thompson,^{1*} Ylva Olsen,¹ Richard P. Mitchell,¹
Anthony Davis,¹ Steven J. Rowland,¹ Anthony W. G. John,²
Daniel McGonigle,³ Andrea E. Russell³

7 MAY 2004 VOL 304 SCIENCE www.sciencemag.org



Aérosols désertiques: aérosols collectés aux Barbades
Crédit photo: Guieu et al., 1994



Destin des photons dans l'océan

Ils subissent avec ces substances les interactions optiques suivantes:

- Absorption

Destin des photons dans l'océan

Ils subissent avec ces substances les interactions optiques suivantes:

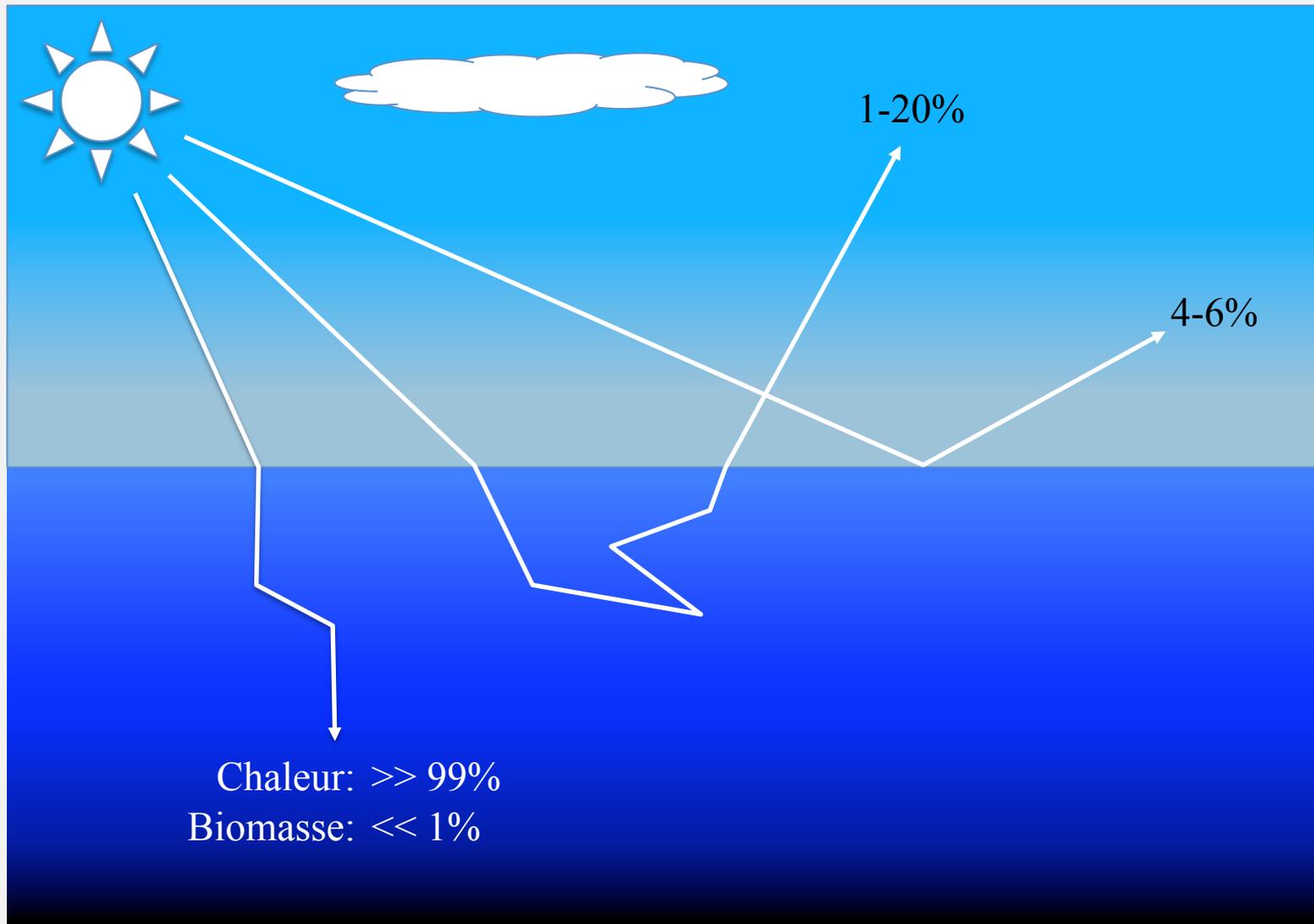
- Absorption
- Diffusion

Destin des photons dans l'océan

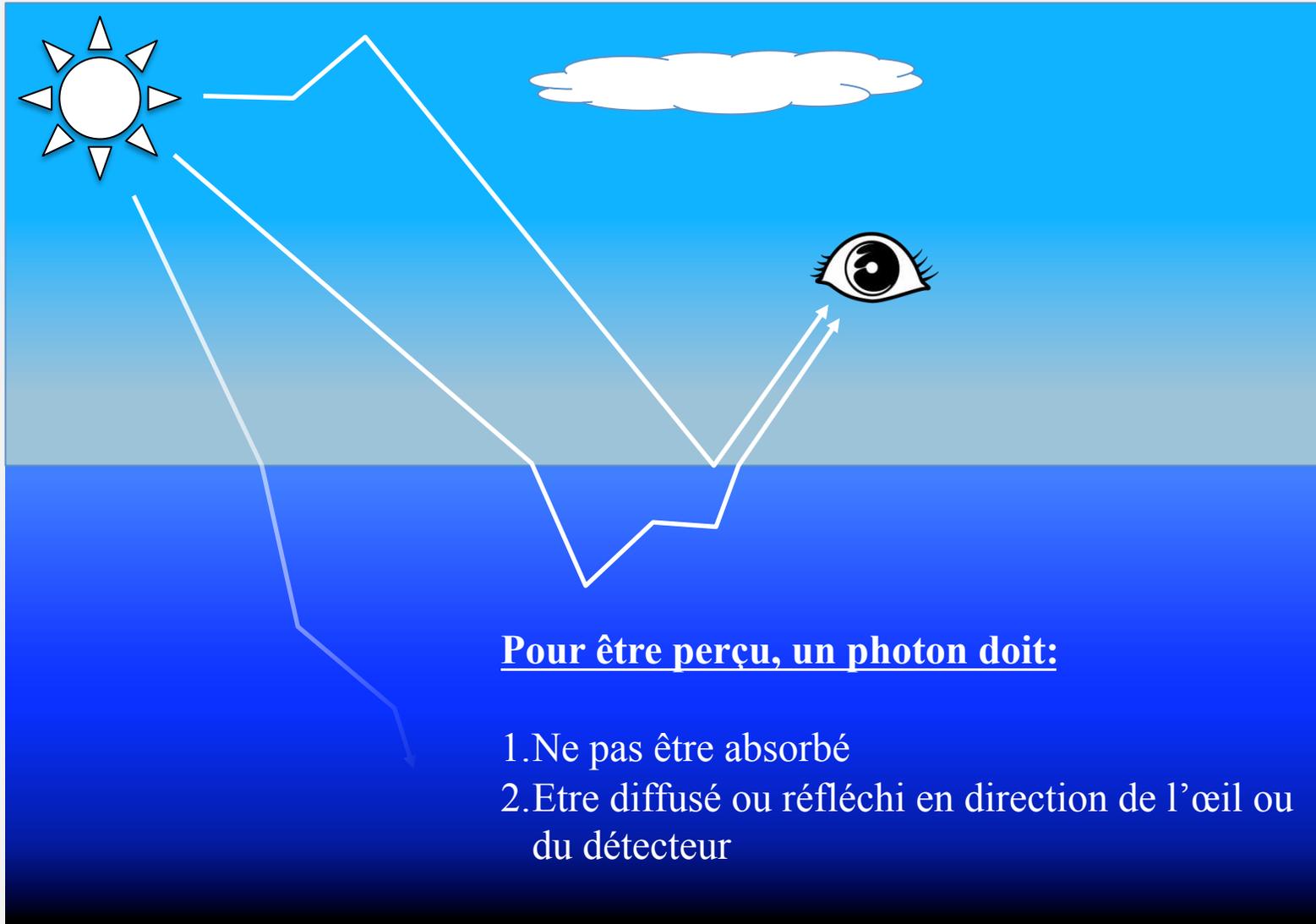
Ils subissent avec ces substances les interactions optiques suivantes:

- Absorption
- Diffusion
- Diffusion inélastique (dont la fluorescence)

Budget de propagation

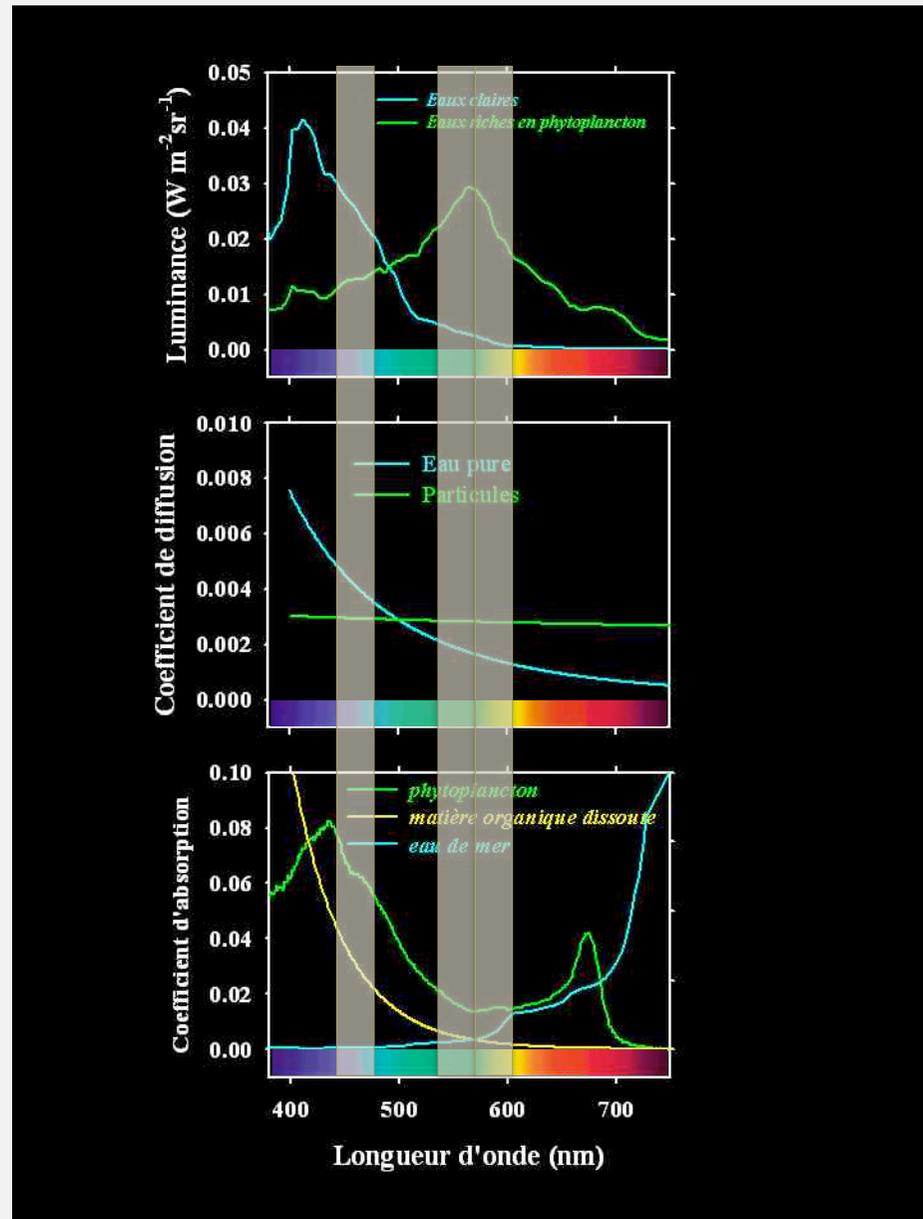


Perception de la couleur de l'océan



Perception de la couleur de l'océan

Comment les propriétés optiques de l'océan déterminent-elles sa couleur?



Perception de la couleur de l'océan



Photo H. Claustre



Photo M. Babin



Photo J.-M. Froidefond



Photo S. Etheridge



Photo S. Etheridge



Perception de la couleur de l'océan

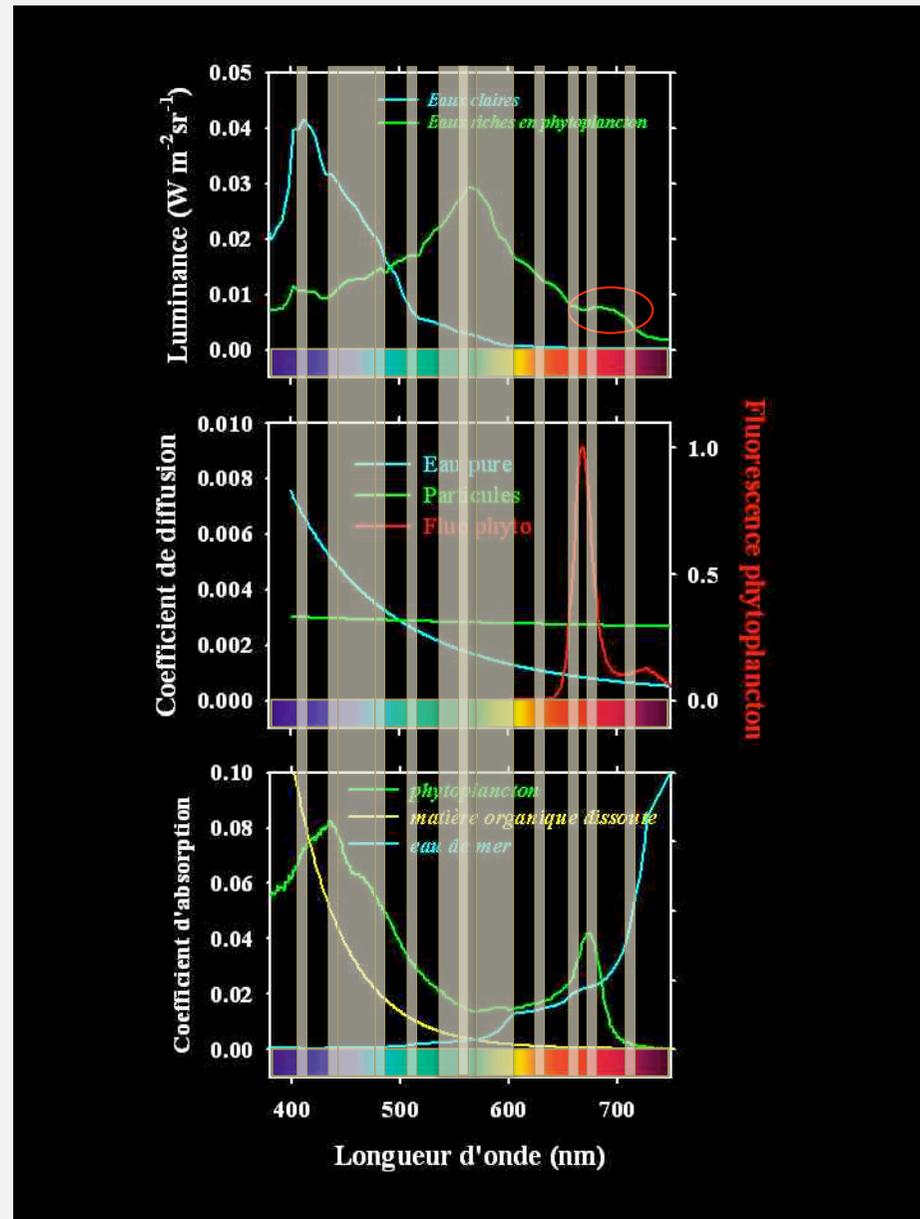


Chl $\sim 3 \text{ mg m}^{-3}$ (Avril 2006)

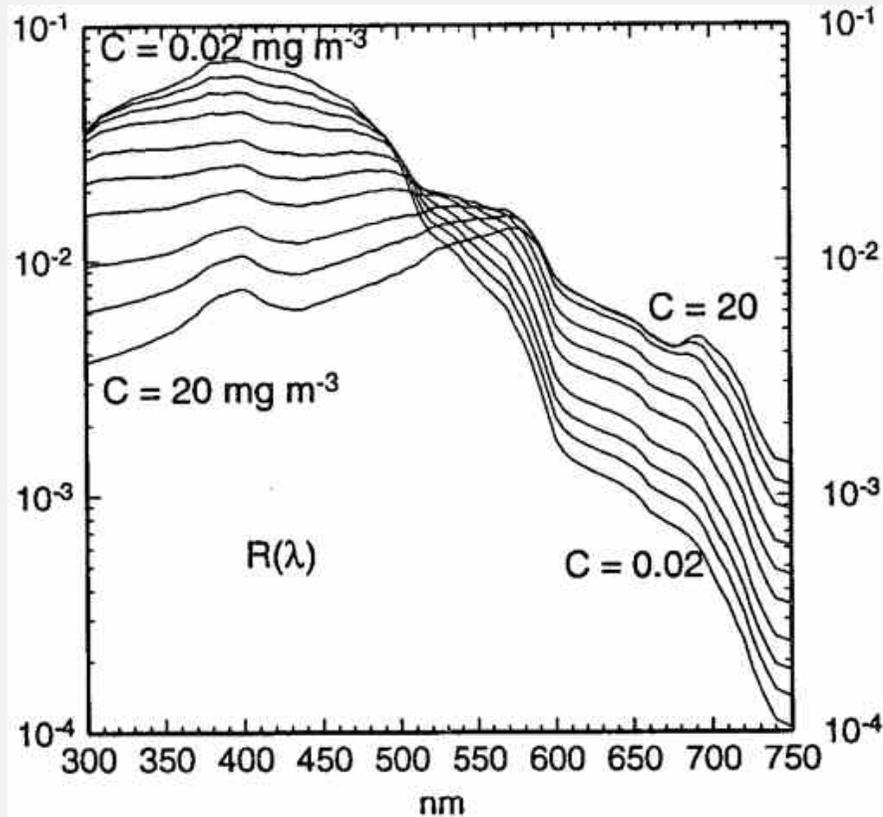
Images réalisées en mer Ligure, entre Corse et continent

Chl $\sim 0.05 \text{ mg m}^{-3}$ (mars 2006)

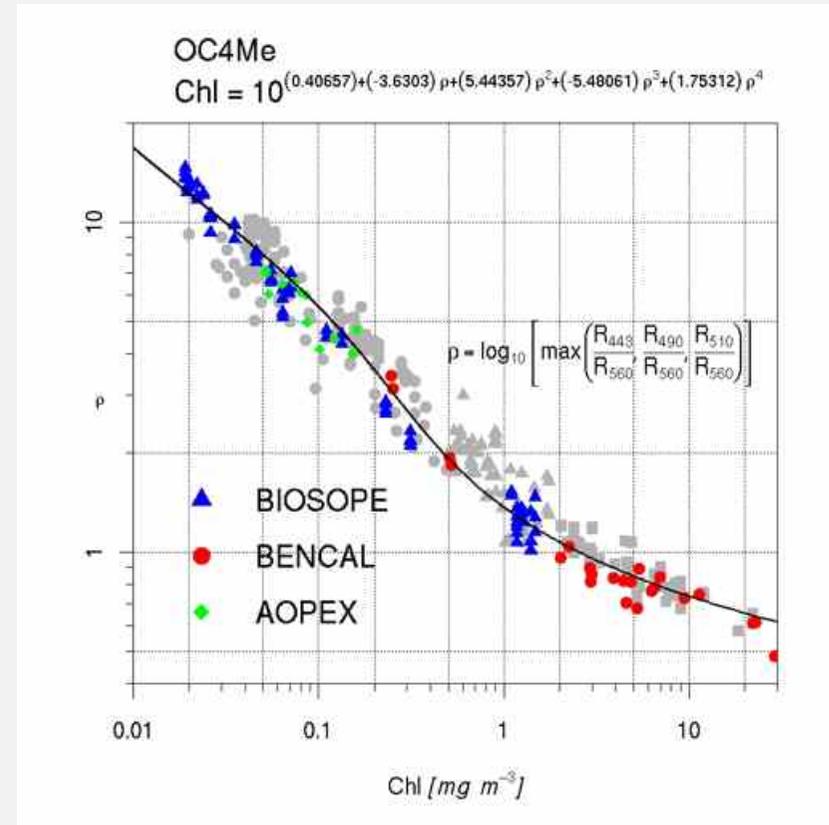
Mesure (quantification) de la couleur de l'océan



Mesure (quantification) de la couleur de l'océan



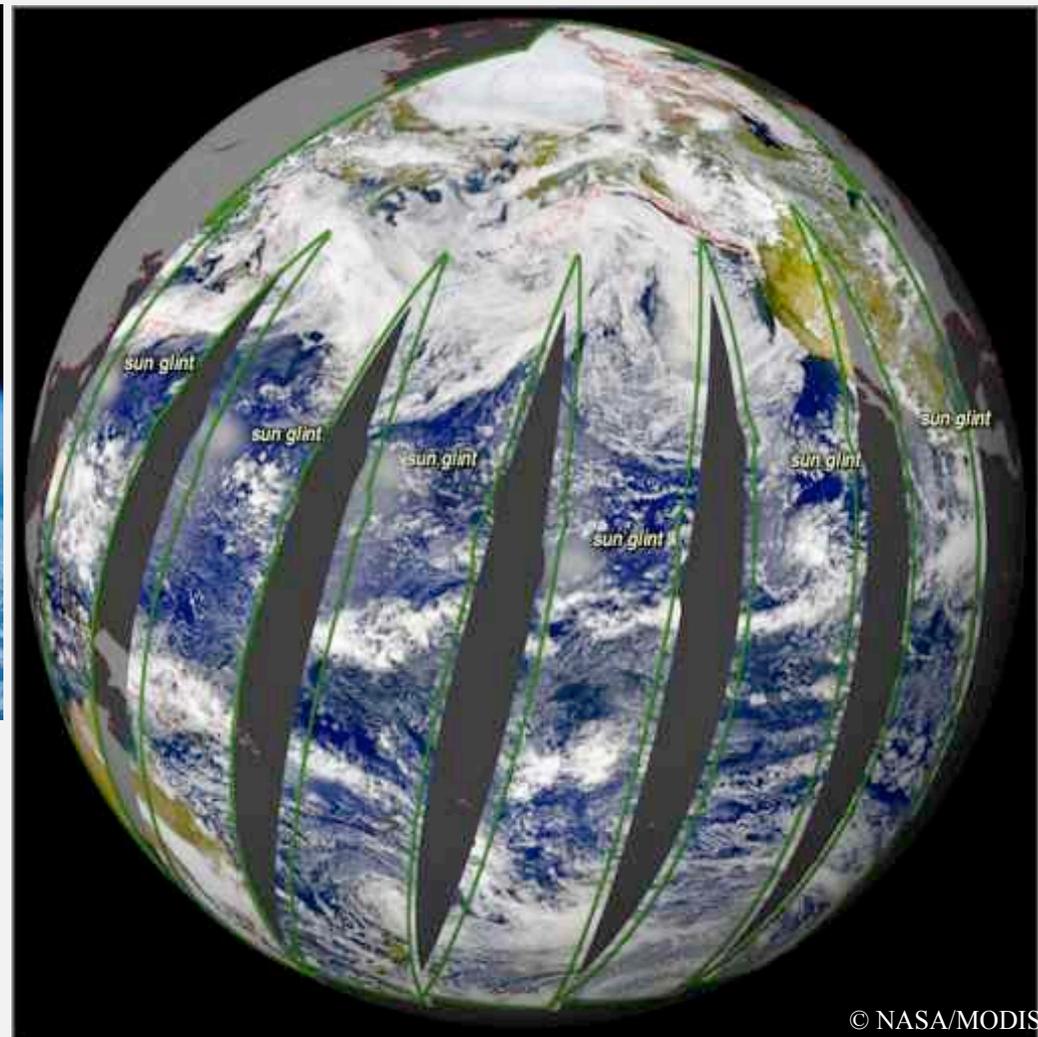
Variations spectrales de la réflectance marine, R (R étant le rapport entre éclairement ascendant et éclairement descendant juste sous la surface)

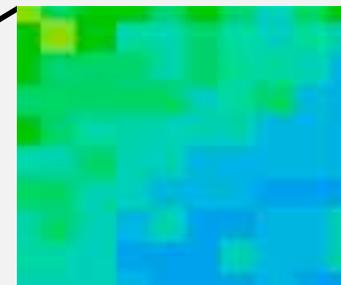
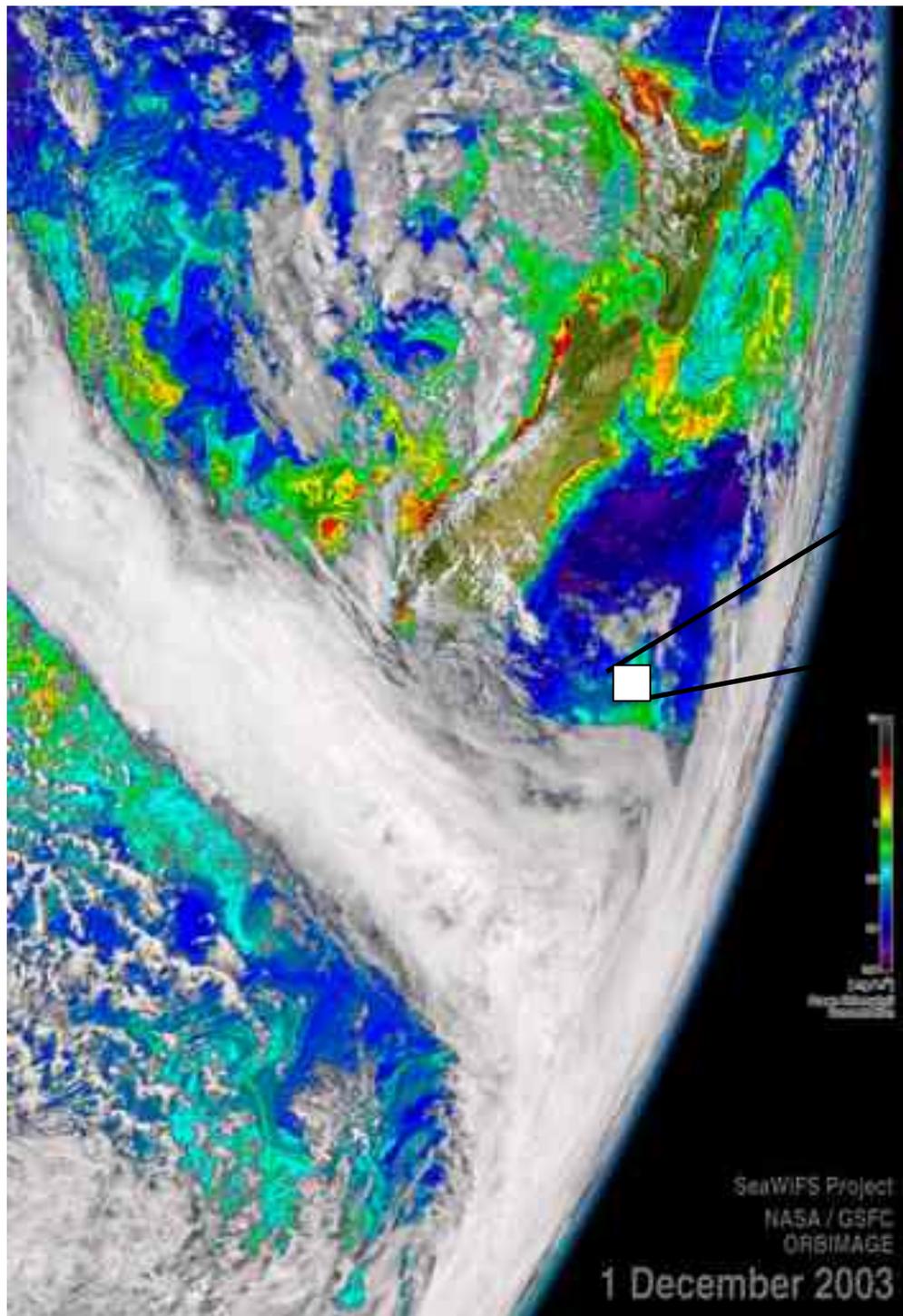


Variations du rapport des réflectances dans le bleu et le vert, en fonction de la concentration en chlorophylle

La télédétection de la couleur de l'océan à partir de l'espace

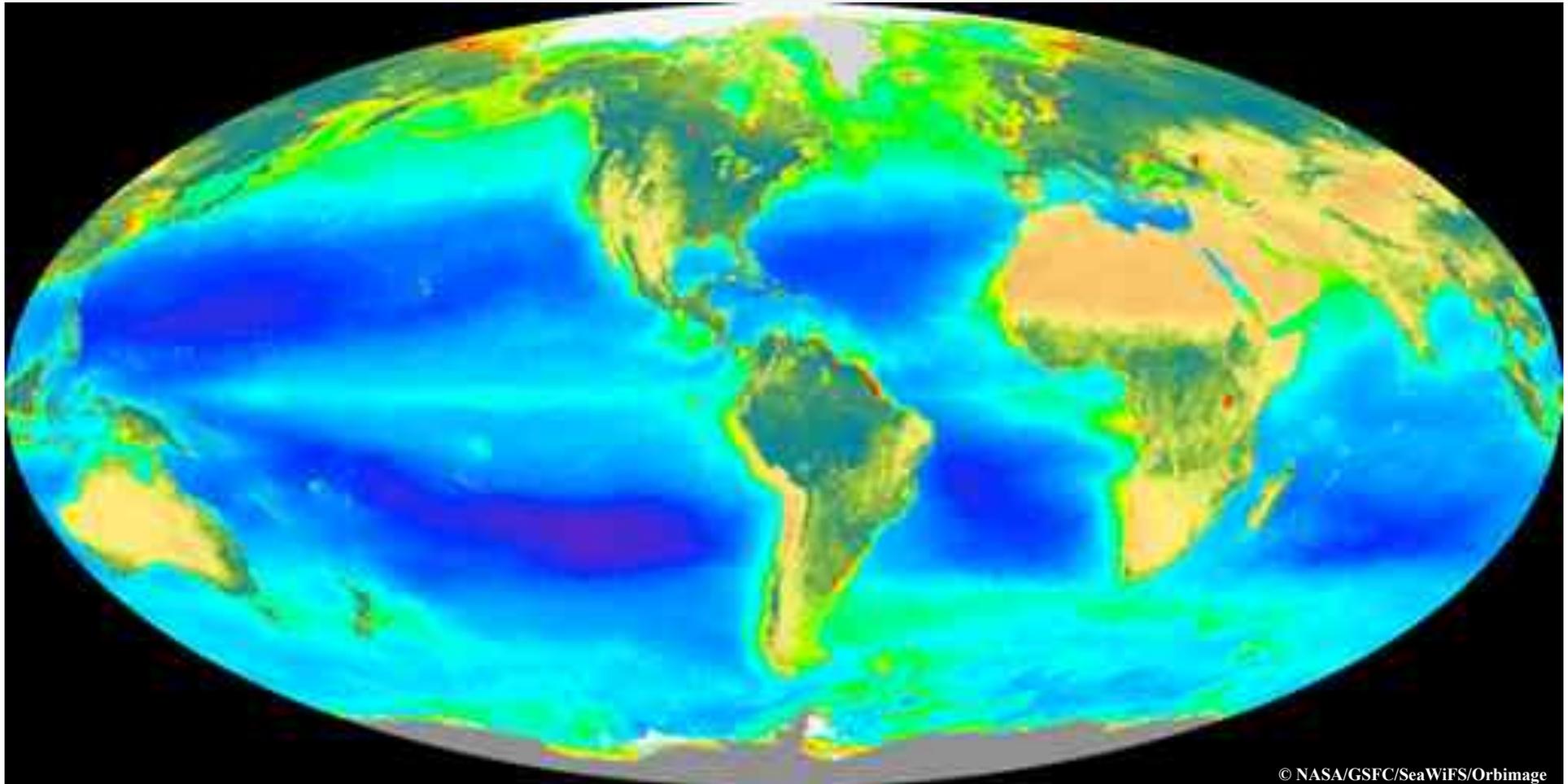
Téledétection satellitale de la couleur de l'océan

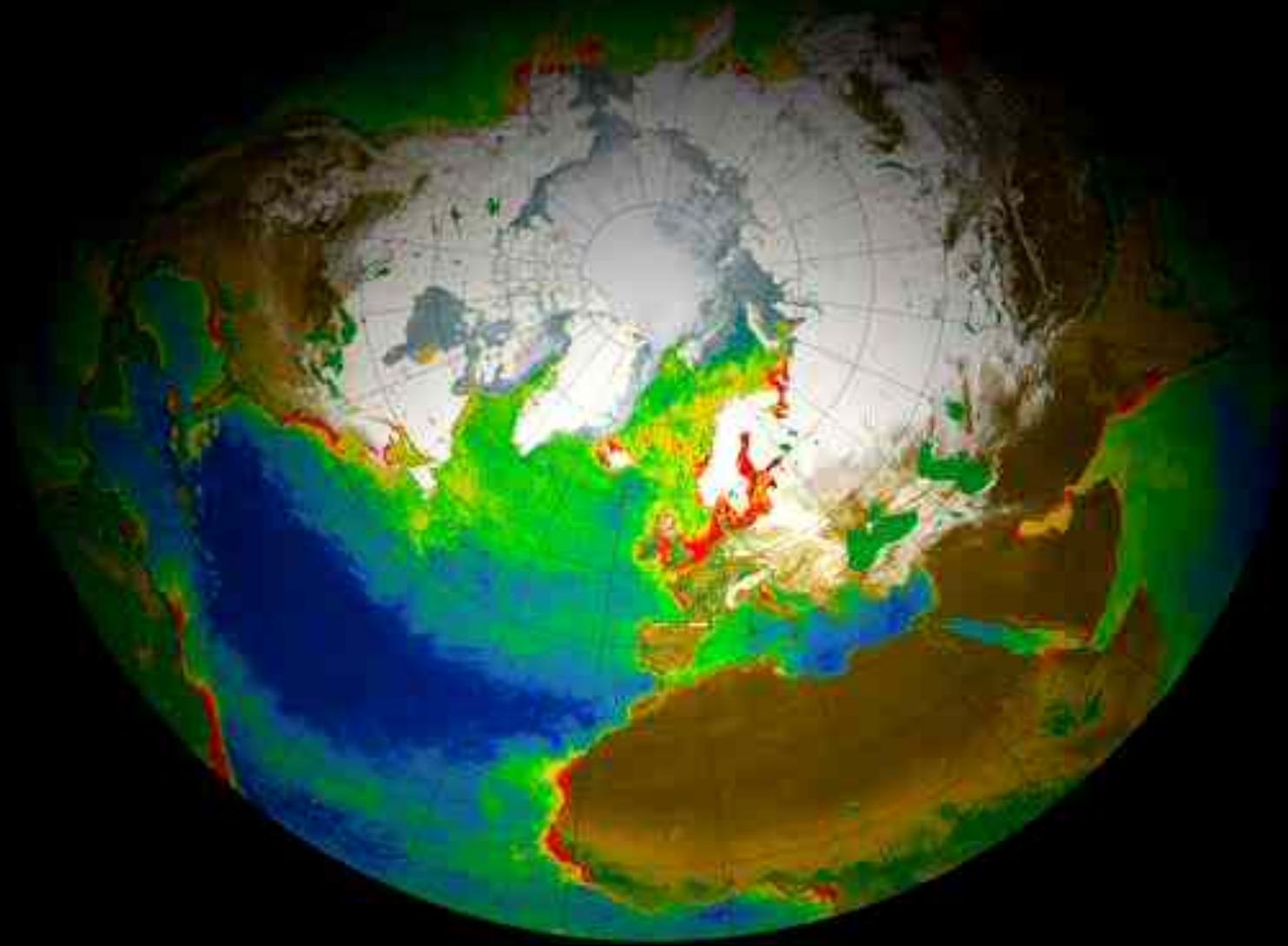




Interprétation quantitative
de la mesure, en terme de
« paramètre ou quantité
géophysique », en chaque
élément de l'image
(« pixel »)

Analyse quantitative de la couleur de l'océan

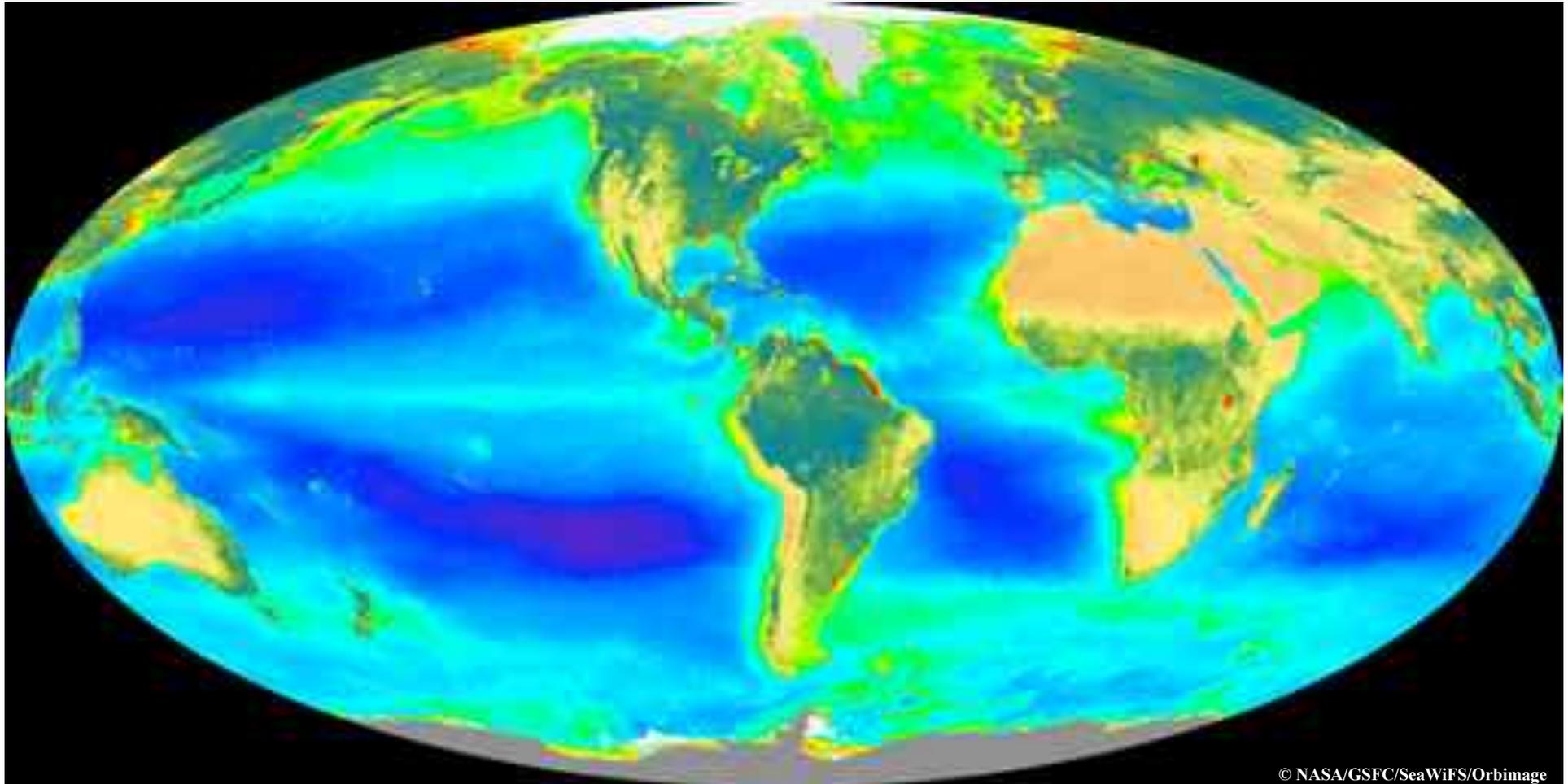




Faisons le point...

- La biomasse phytoplanctonique est un maillon essentiel du cycle global du carbone
- Dans les « eaux du large » (~95% des océans), le phytoplancton et les particules et substances dissoutes qui lui sont associées sont responsables des changements de la « couleur de l'océan »
- Cette couleur peut s'exprimer par des quantités physiques (optiques). Elle permet donc de quantifier la concentration en chlorophylle dans les eaux de surface
- Cette quantification est maintenant réalisée à échelle globale grâce aux satellites d'observation de la Terre; cela permet une étude détaillée des distributions à grande échelle et des variations temporelles aux échelles saisonnières à interannuelles

Lien avec le climat ?



Lien avec le climat ?

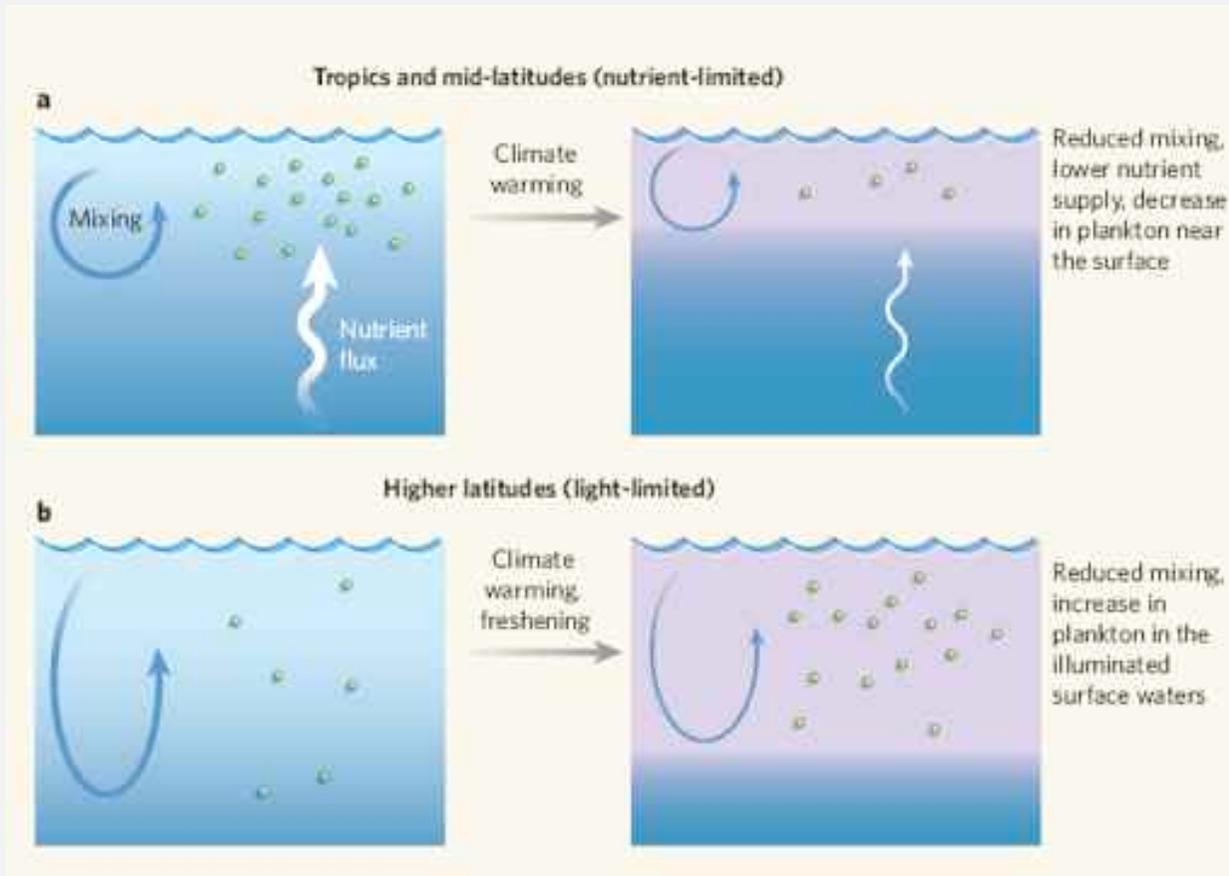


Figure 1 dans Doney S., 2006, Nature, 444, 695-696.

La “pompe biologique” est affectée par les changements de stratification des eaux de surface (température)

Les flux de CO_2 à l’interface air-mer le sont aussi

- Quel est l’équilibre global entre ces deux effets?
- Y-a-t-il d’autres mécanismes allant dans le sens s’une augmentation ou d’une diminution de la biomasse chlorophyllienne ?

Comment peut-on déterminer les changements de la chlorophylle (phytoplancton) sur de longues échelles de temps?

Données de terrain (in situ):

Rares et dispersées dans une perspective globale, et d'autant plus que l'on s'intéresse aux longues échelles de temps (décennale et +). Problèmes d'homogénéité des méthodes. Futur des séries temporelles actuelles ? (continueront-elles encore pendant plusieurs décennies?)

Observations satellitaires de la “couleur de l’océan”:

Globales. Des archives “long terme” sont juste en début de construction. Problèmes d'homogénéité entre capteurs et méthodes de traitement

Modèles couplés physique-biologie (1D):

Les longues échelles de temps sont accessibles pour peu que les forçages existent. Grandes incertitudes dans la représentation de la biologie. Physique « simpliste »

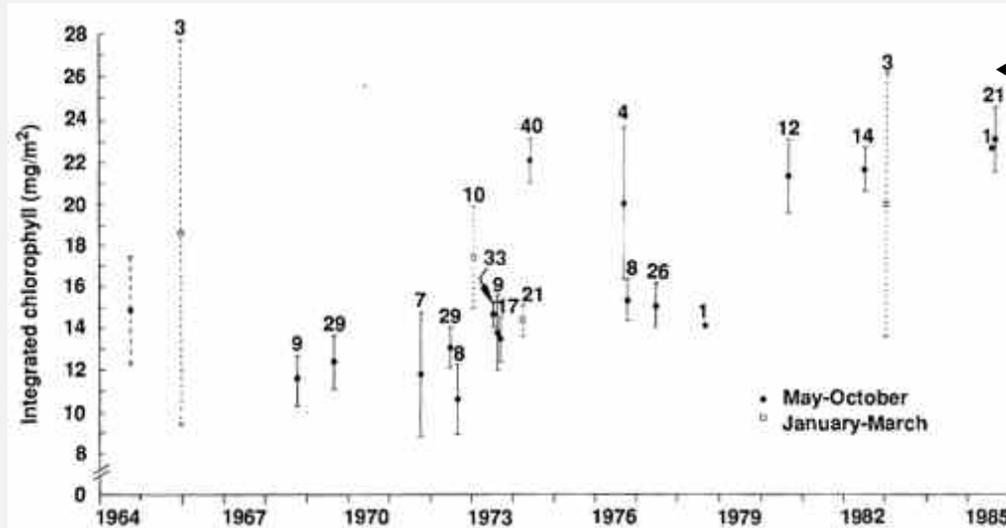
Modèles couplés physique-biologie (3D):

Les longues échelles de temps sont accessibles pour peu que les forçages existent. Globaux. Physique explicite 3D. Grandes incertitudes dans la représentation de la biologie

Changements avérés: résultats de plusieurs études

Liste non exhaustive...

Le sujet n'est pas nouveau...

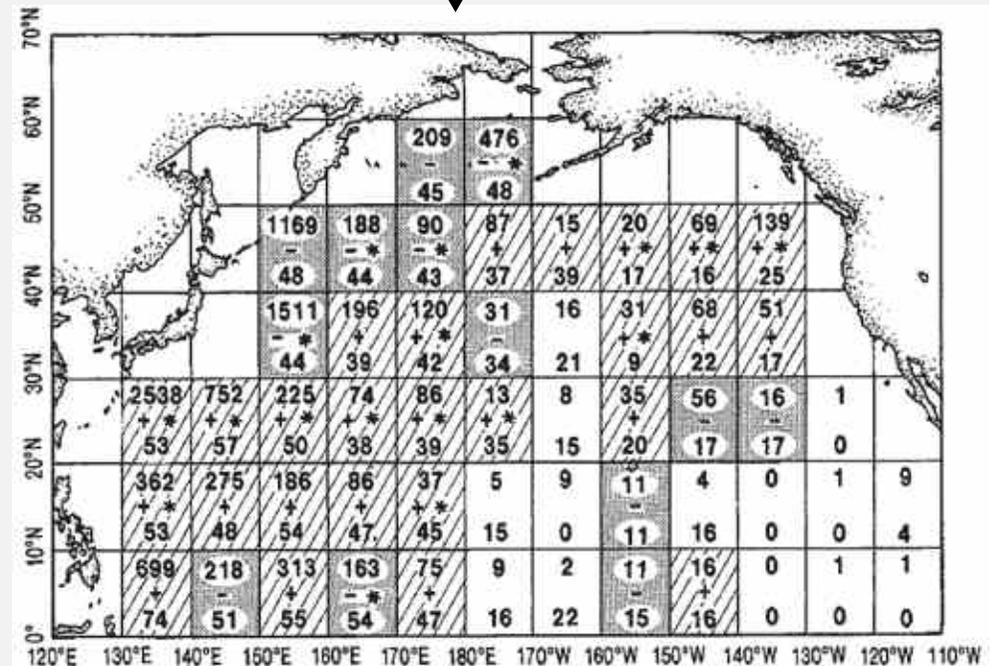


← Mesures de terrain de Chl

Mesures de terrain de la profondeur
du "disque de Secchi" (transparence)

Venrick et al., Science, 238, 1987

Changements dans le Pacifique central nord
« saut » aux alentours de 1973

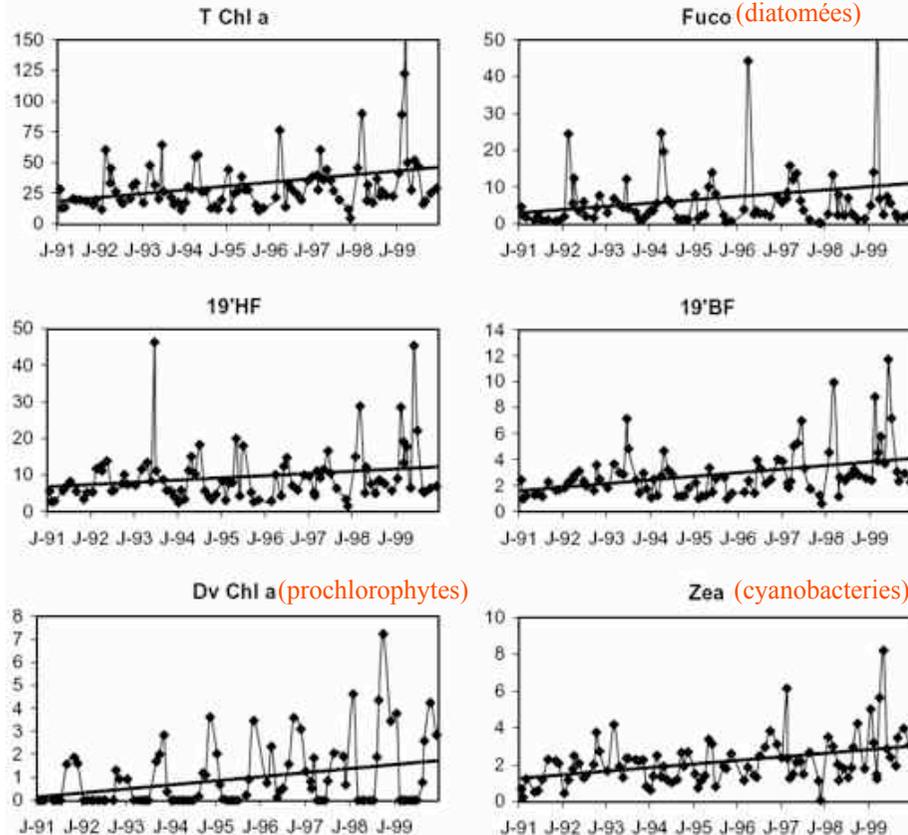


Falkowski and Wilson, Nature, 358, 1992

Trends over ~70 years (1900-1980) in the north Pacific ocean,
derived from Secchi disk measurements.

**Changements mineurs; pas d'effet sur
l'augmentation du CO₂ atmosphérique**

2 exemples à partir des séries de mesure « JGOFS »

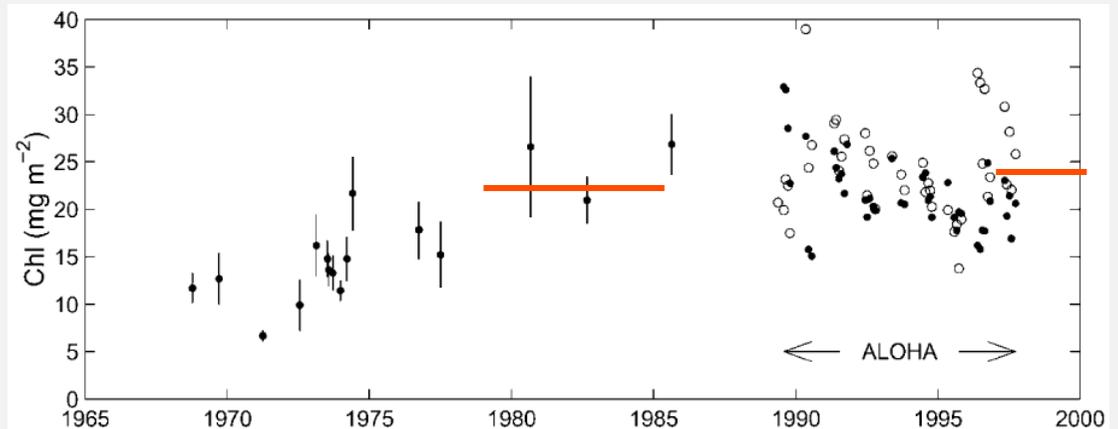


« **DYFAMED** », Mer Méditerranée
J.-C. Marty et al. Deep-Sea Research II 49 (2002)

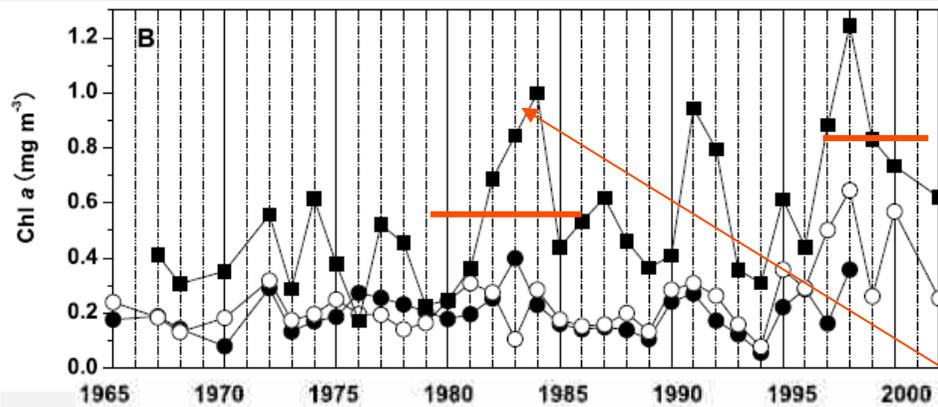
Changements de Chl et d'autres pigments
 "diagnostiques"

Changements de Chl-a en parallèle à des
 changements de Chl-b, indiquant un
 changement de structure de la communauté
 phytoplanctonique (vers la domination des
 procaryotes)

« **HOT** », Pacifique subtropical nord, *D.M. Karl et al. / Deep-Sea Research II 48 (2001)*

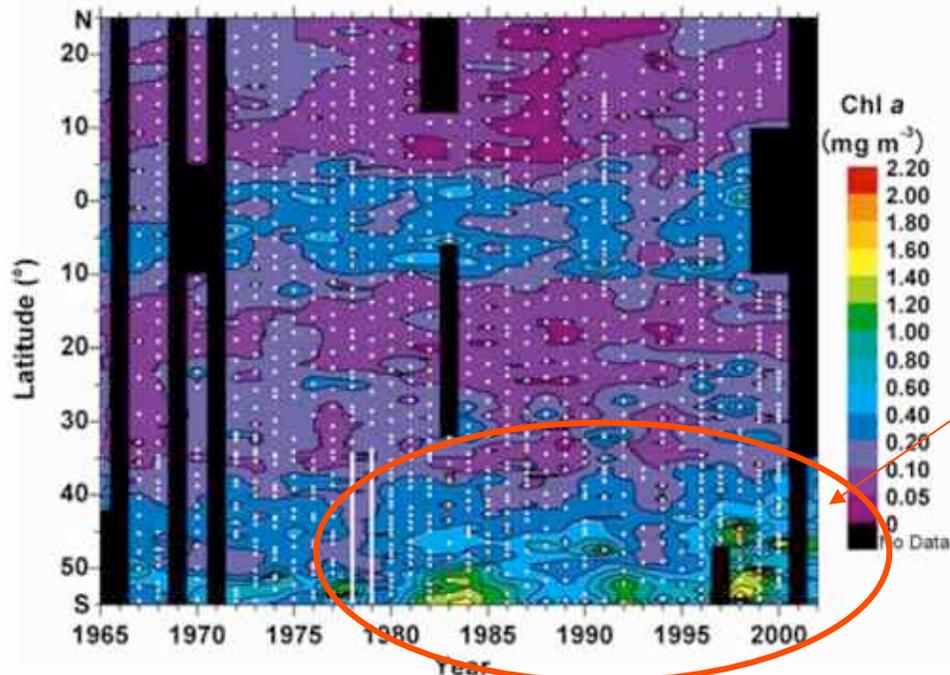
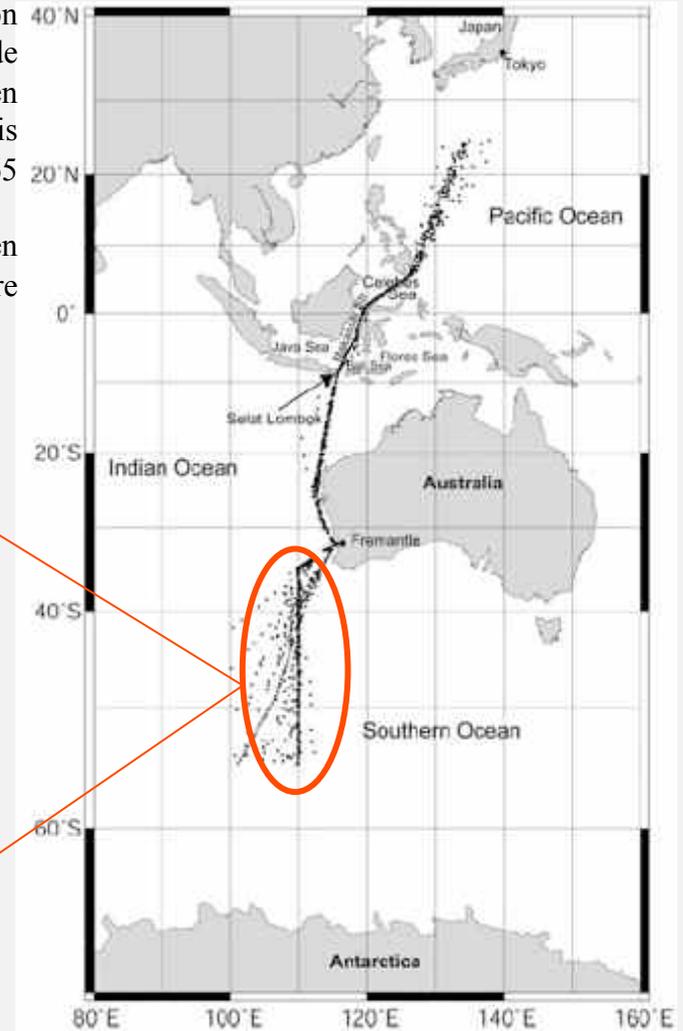


Hirawake et al., *Geophys. Res. Letters*, vol. 32, 2005



Expédition
Japonaise de
recherche en
Antarctique depuis
1965

échantillonnage en
Décembre



Augmentation de Chl dans l'océan
austral

Saviez-vous que l'océan a perdu les 2/3 de sa biomasse au cours du XX^{ème} siècle?

Boyce D.G., M. R. Lewis, and B. Worm, 2010, Global phytoplankton decline over the past century, *Nature*, 466, 591-596.

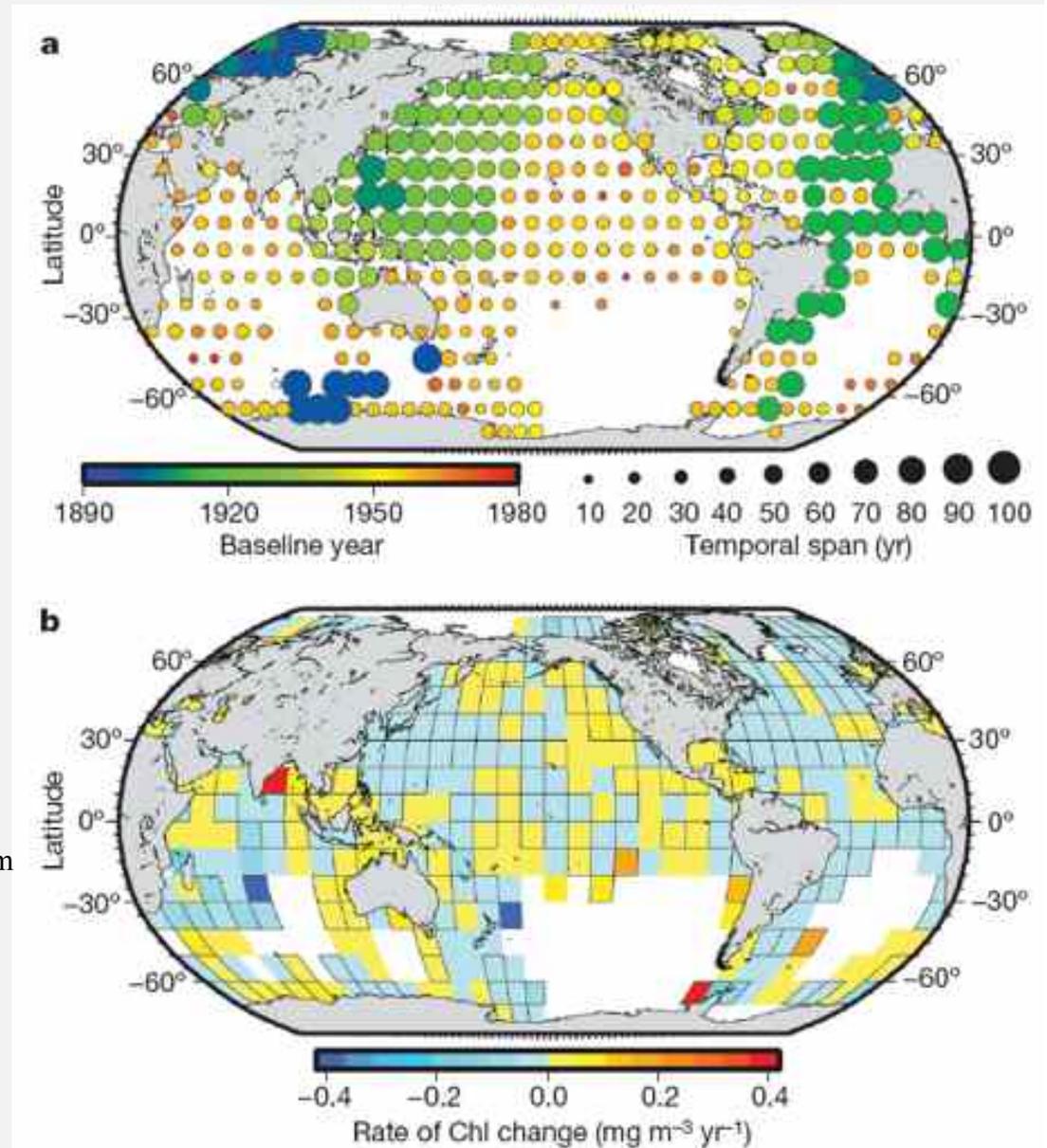
Si cela avait effectivement eu lieu, les conséquences sur le “taux de chauffage” des couches supérieures, sur les pêcheries et tous les niveaux de l'écosystème auraient été énormes

Par ailleurs, a-t-on des indications de changements dans la physique des océans qui auraient pu amener à cette énorme diminution de la biomasse? En fait, non

Cette étude a légitimement amené à une controverse

Communications (*Nature*, vol 472, 14 Avril 2011) Arising from 'Global phytoplankton decline over the past century,' Boyce *et al.* (2010):

- Rykaczewski, RR and JP Dunne. A measured look at ocean chlorophyll trends.
- Mackas, D.L., Does blending of chlorophyll data bias temporal trends?
- McQuatters-Gollop et al., Is there a decline in marine phytoplankton

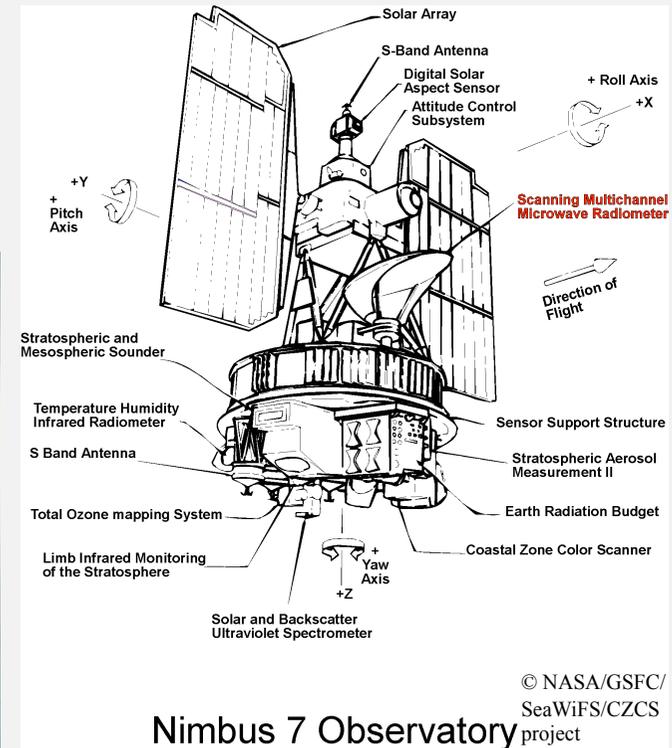


L'apport des satellites

Les 2 missions mentionnées ici

« Coastal Zone Color Scanner » (**CZCS**)
à bord du satellite NIMBUS7 de la NASA,
de 1979 à 1986

http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS/czcs_instrument.html



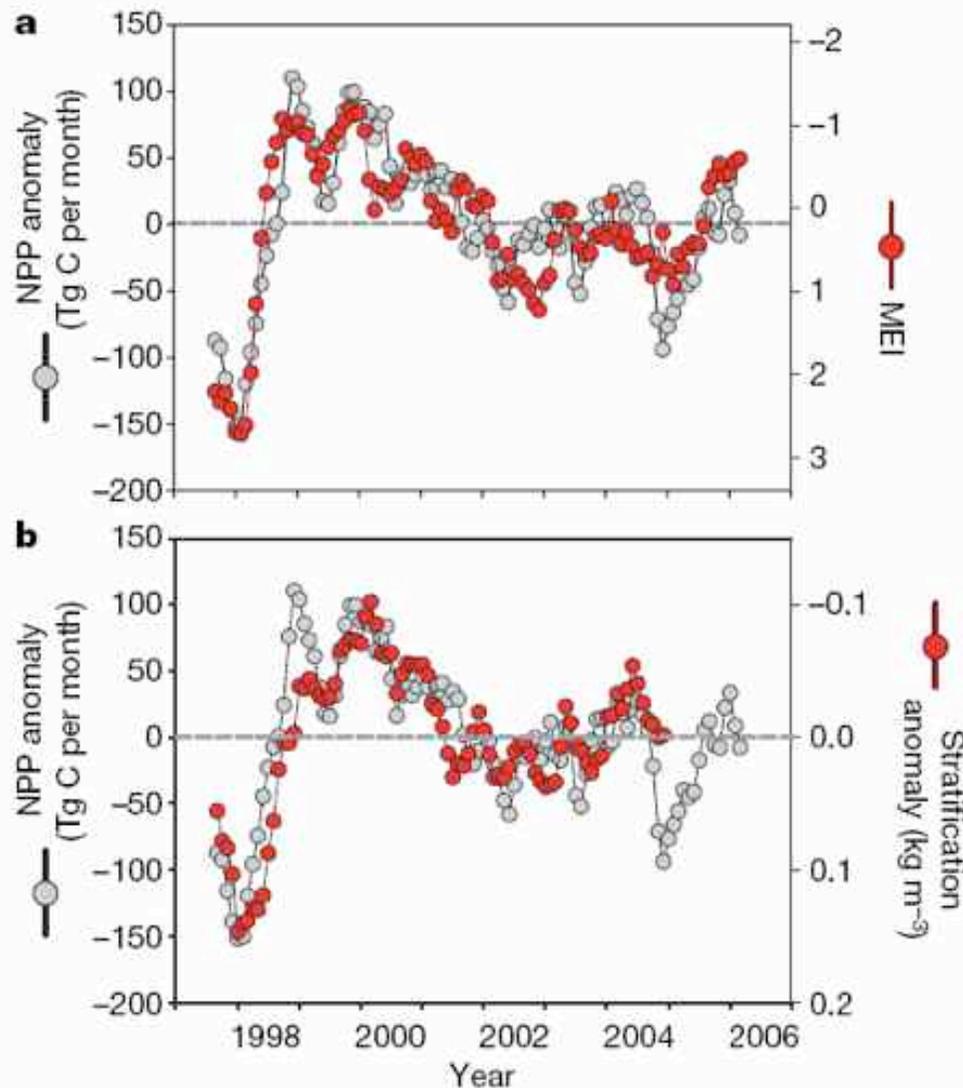
« Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor » (**SeaWiFS**)
à bord du satellite Orbview2, OSC/NASA/Orbimage
De Sept. 1997 à Déc. 2010

<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>



Behrenfeld et al., *Nature*, vol 444, 2006

9 années de données SeaWiFS couplées à des indicateurs du degré de stratification de l'océan



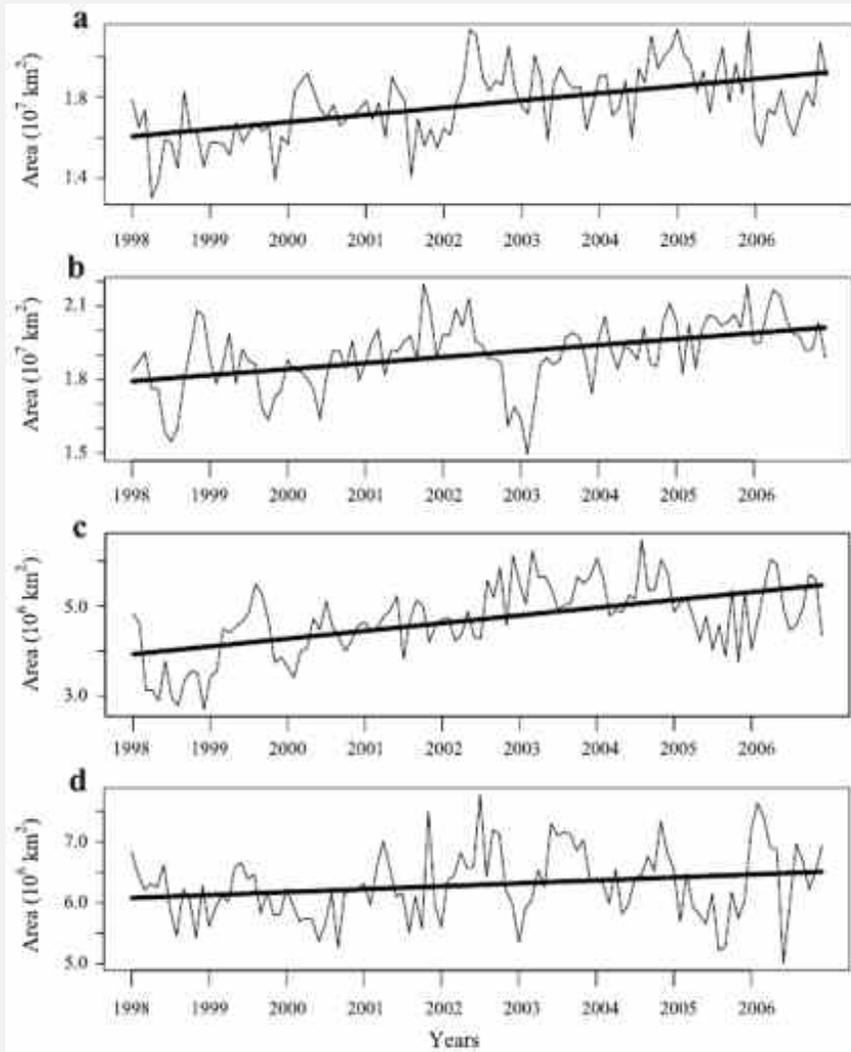
Les anomalies de Chl et de la production primaire (NPP; en gris) sont corrélées avec le “Multivariate ENSO index” (MEI; en rouge) ou l’anomalie de stratification (en rouge aussi; différence de densité entre la surface et 200 m)

(le “MEI” inclut la pression atmosphérique à la surface, le vent, la température de surface, la température de l’air et la nébulosité)

Il ne s’agit pas ici d’une étude multi-décennale. Elle indique comment l’océan peut réagir à de futurs changements de stratification

Polovina *et al.*, GRL, 2008, VOL. 35, L03618, doi: 10.1029/2007GL031745

“Ocean’s least productive waters are expanding”



Etendues où $Chl < 0.07 \text{ mg m}^{-3}$ (données SeaWiFS)

Irwin & Oliver., GRL, 2009, VOL. 36, L18609, doi:10.1029/2009GL039883

“Are ocean deserts getting larger?”

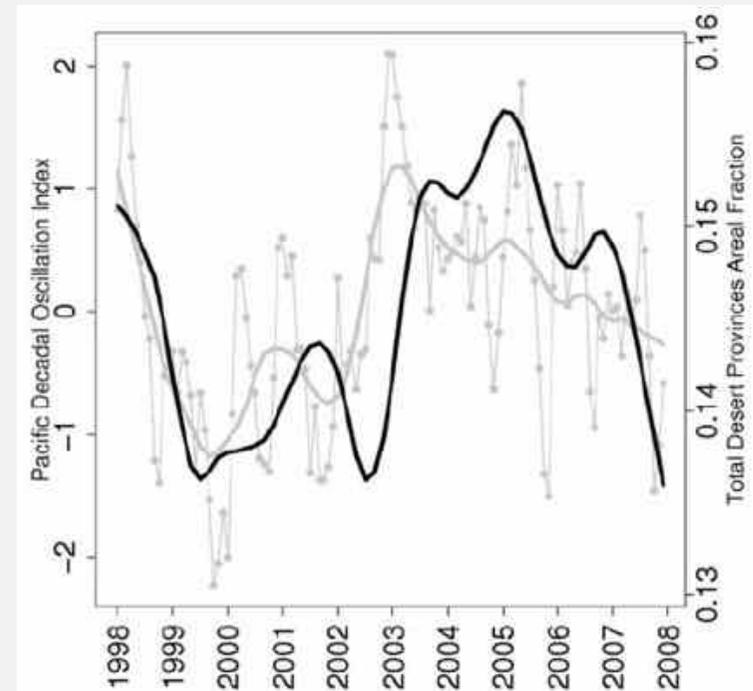
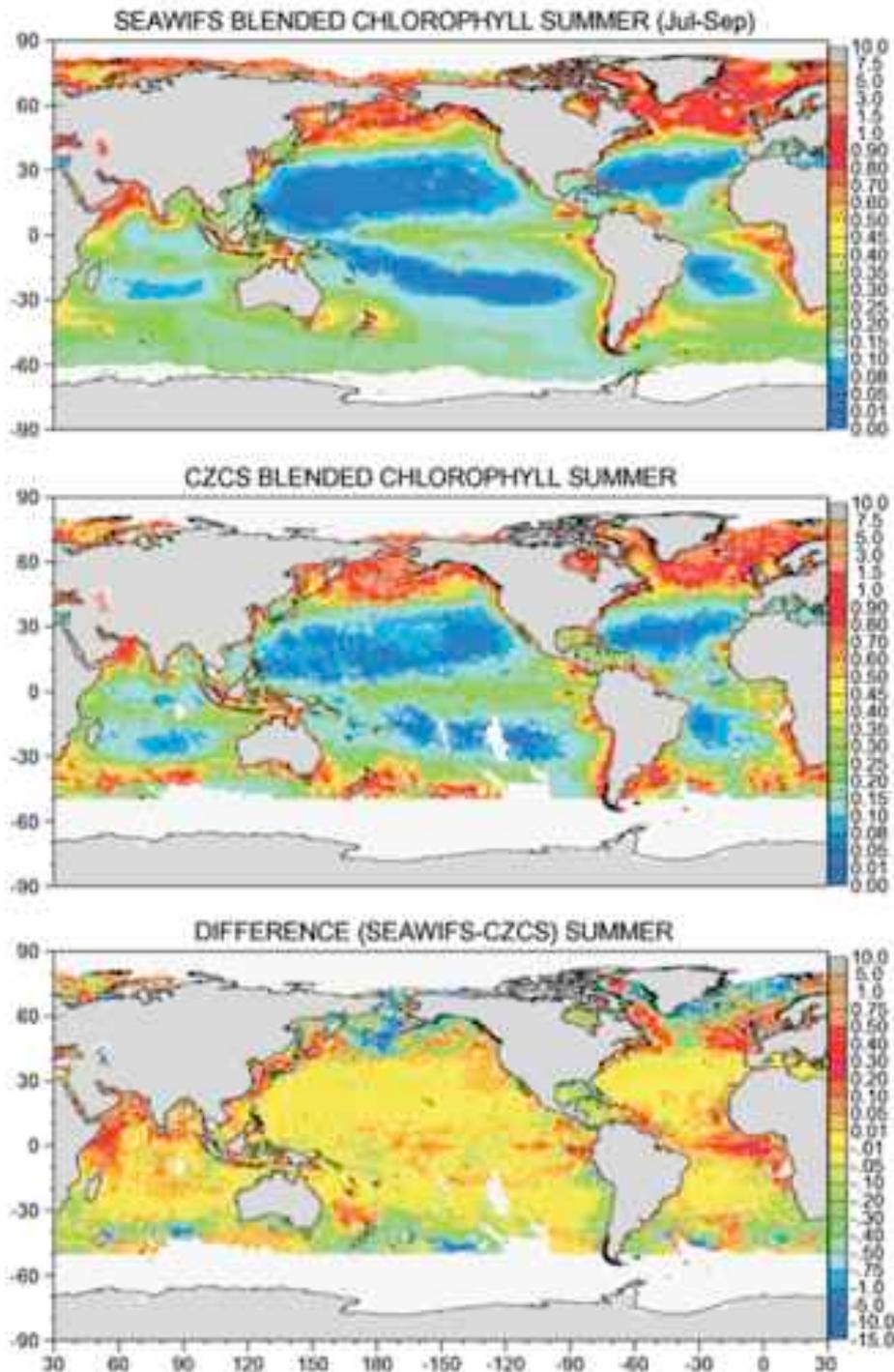


Figure 3. The Pacific Decadal Oscillation Index (grey) is correlated with the de-seasoned global sum of the three oligotrophic province areas (SeaWiFS/AVHRR, black). The correlation between the de-seasoned data (lines) is $R = +0.65$, $p < 0.001$.

Classification des zones oligotrophes basées sur la radiométrie, la Chl et la température (analyse en “cluster”)

Comment avoir accès à une période de temps plus longue?

→ Utilisation des données du capteur
“CZCS”



Watson Gregg (NASA/GSFC)
et collabs.

(Gregg and Conkright, 2001, 2002; Gregg et al., 2002, 2003)

Ré-analyse des données CZCS (1979-1985) et fusion avec des données *in situ* de la chlorophylle.

Idem avec les données SeaWiFS

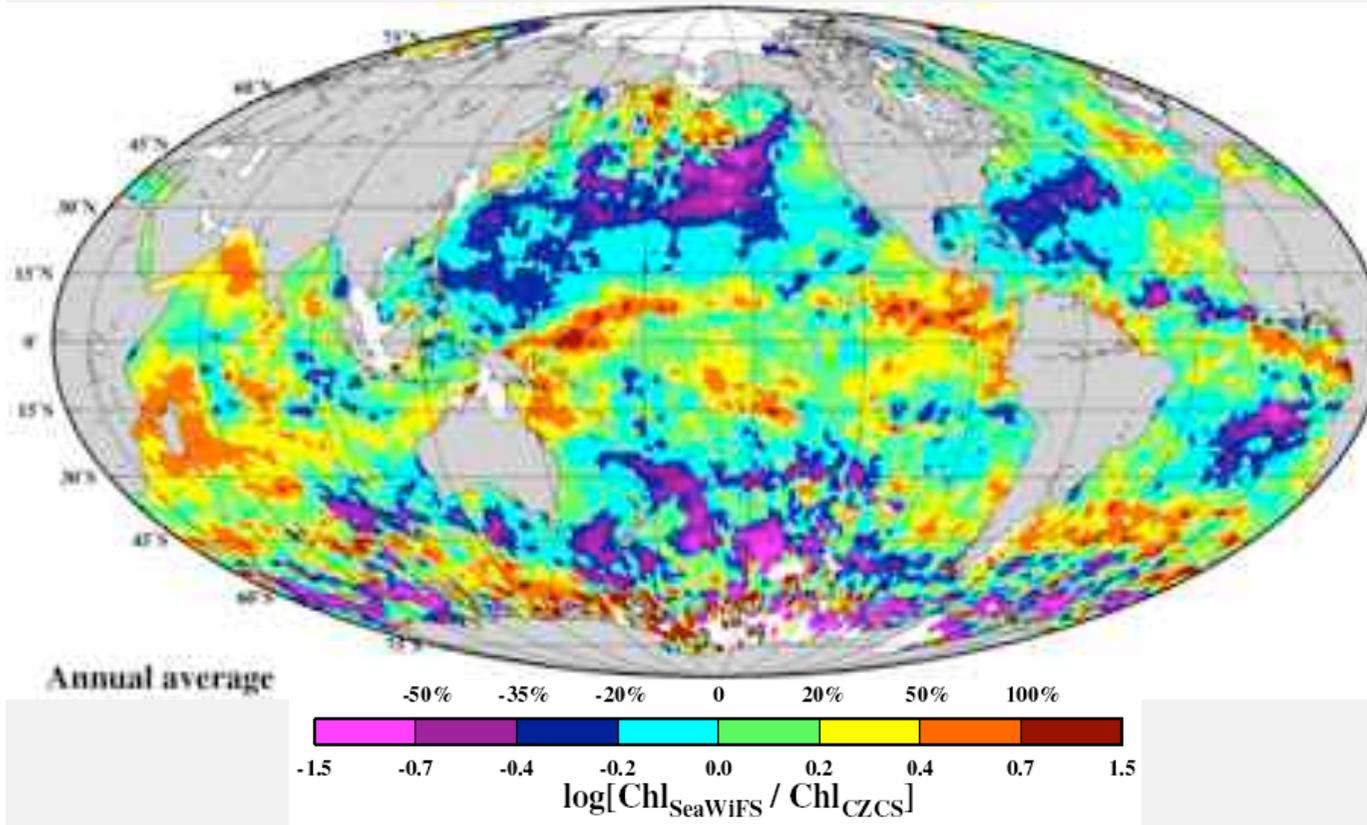
Comparaison des deux.

Diminution de 6% de la chlorophylle à l'échelle globale des années 1980 (CZCS) aux années 2000 (SeaWiFS)

Figure 2 dans *Gregg and Conkright, Geophys. Res. Letters, vol 29, 2002*

Antoine, Morel, Gordon, Banzon & Evans, 2005

LOV & Univ. Miami, RSMAS



Augmentation générale de ~20%

Antoine, D., Morel, A., Gordon, H.R., Banzon, V.F. and R.H. Evans (2005) Bridging ocean color observations of the 1980's and 2000's in search of long-term trends. *J. Geophys. Res.*, VOL. 110

Logique: produire un enregistrement de la couleur de l'océan de "qualité climatique" sur 20 ans, de CZCS à SeaWiFS:

Utiliser CZCS car c'est la seule manière d'obtenir une série "longue", une fois combiné à SeaWiFS

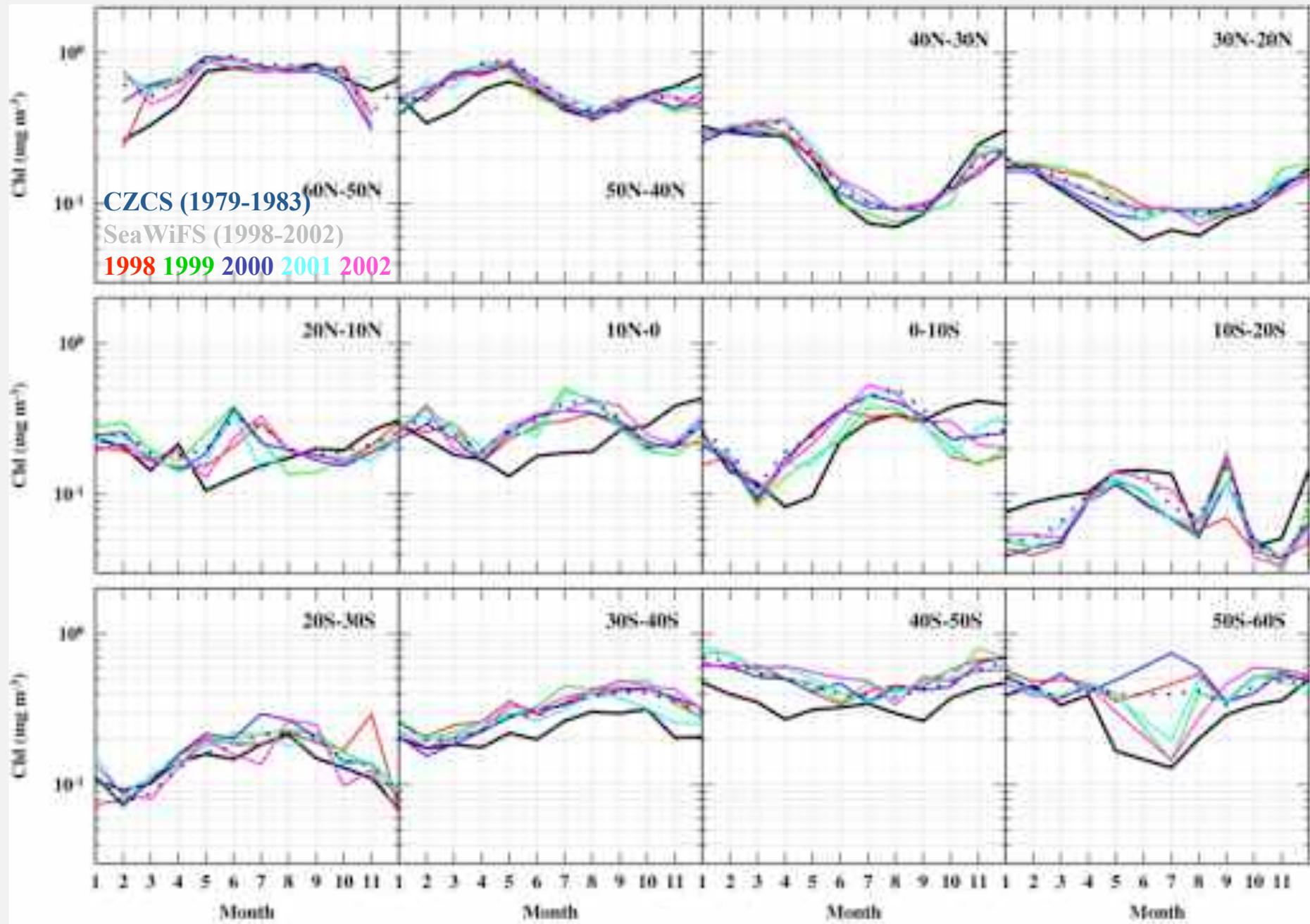
Utiliser strictement les mêmes techniques pour "traiter" les deux séries d'observations

Réviser les étalonnages

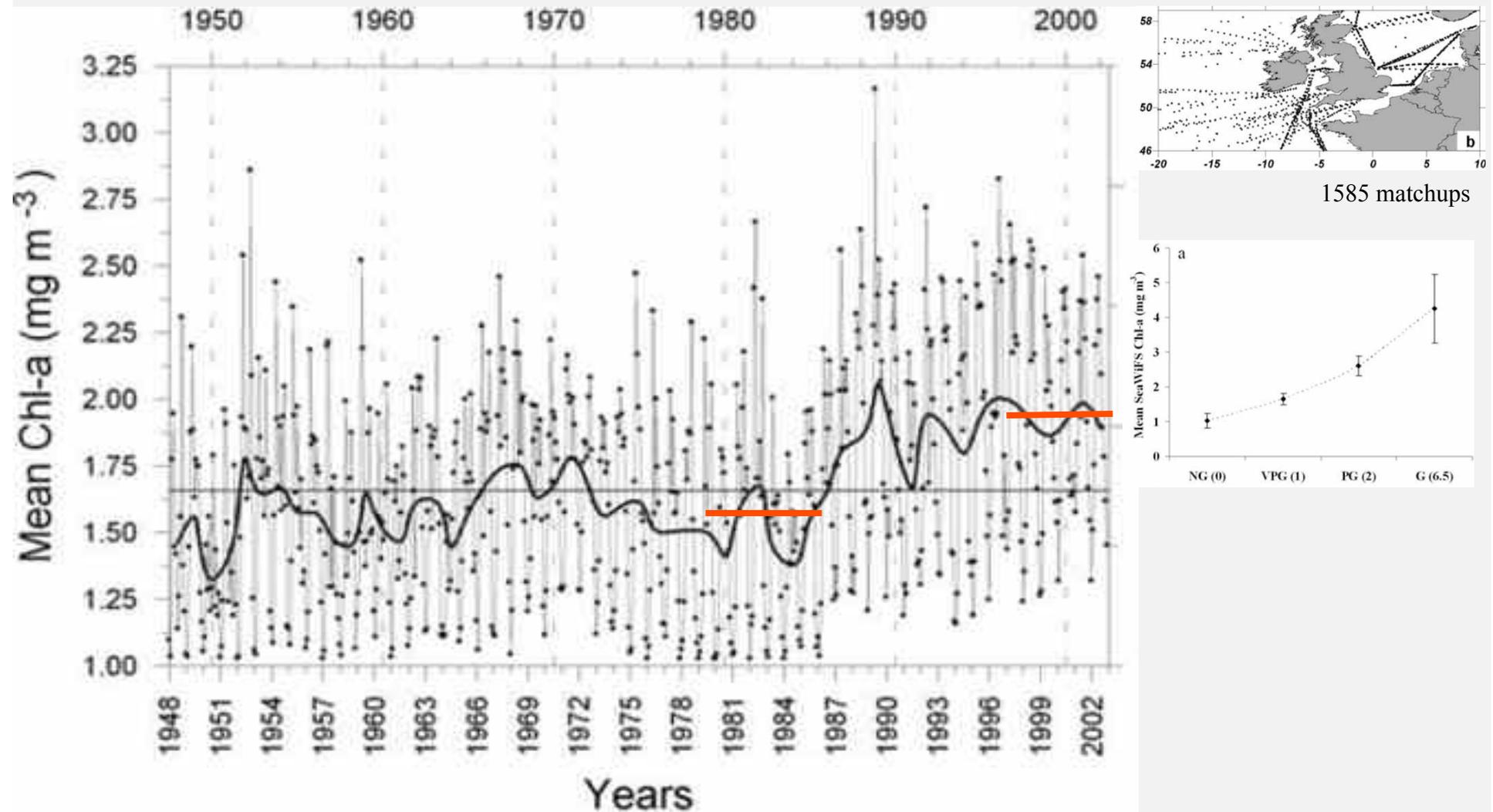
Etre le plus possible indépendant de toute autre source de données

Comparaison des moyennes sur 2 périodes de 5 ans: 1979-1983 et 1998-2002

Antoine et al., 2005: changements des cycles saisonniers: l'Atlantique



Raitsos et al., *Geophys. Res. Letters*, vol 32, 2005
(Univ. Plymouth / SAHFOS)

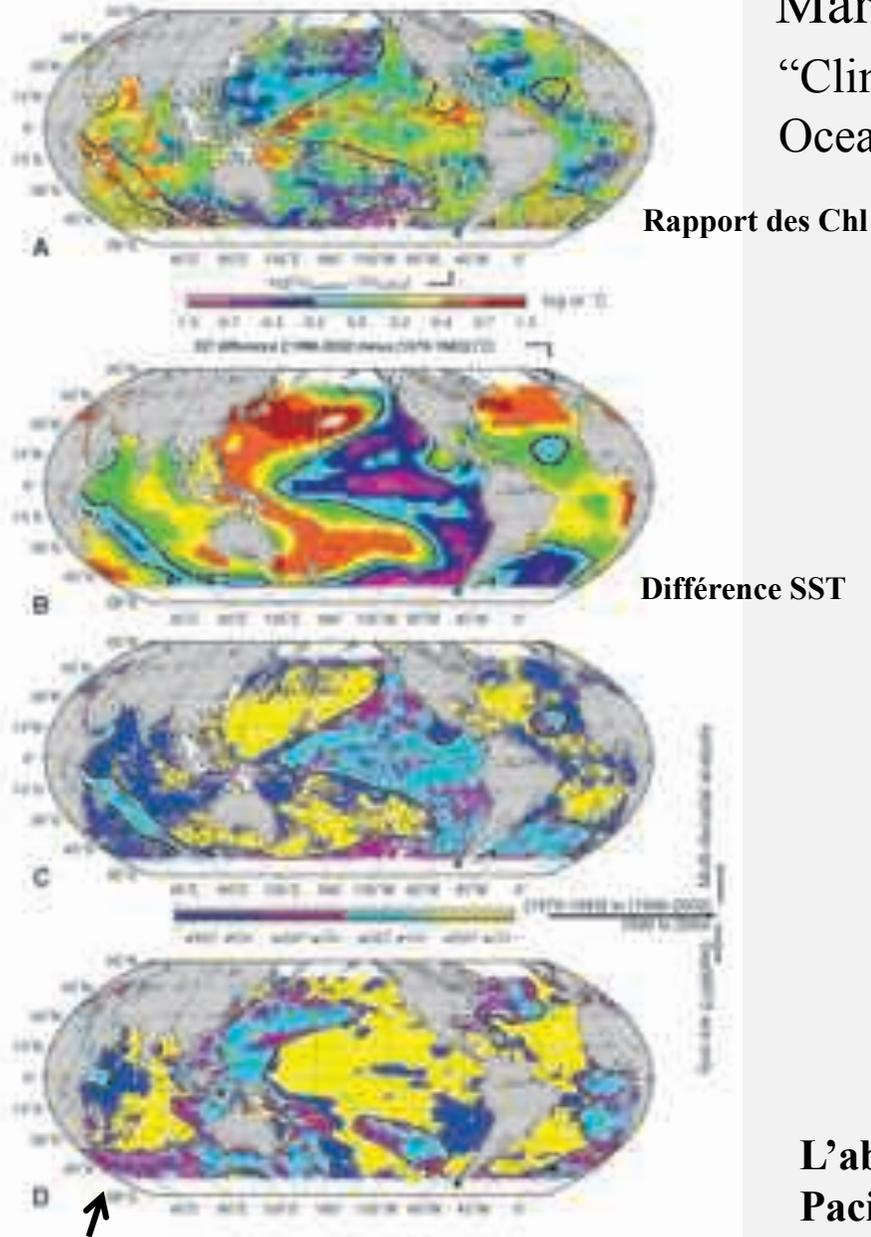


Etalonnage du “color index” du *Continuous Plankton Recorder* (CPR) en utilisant les données SeaWiFS (1997-2002), et extension 50 ans en arrière dans l’Atlantique nord

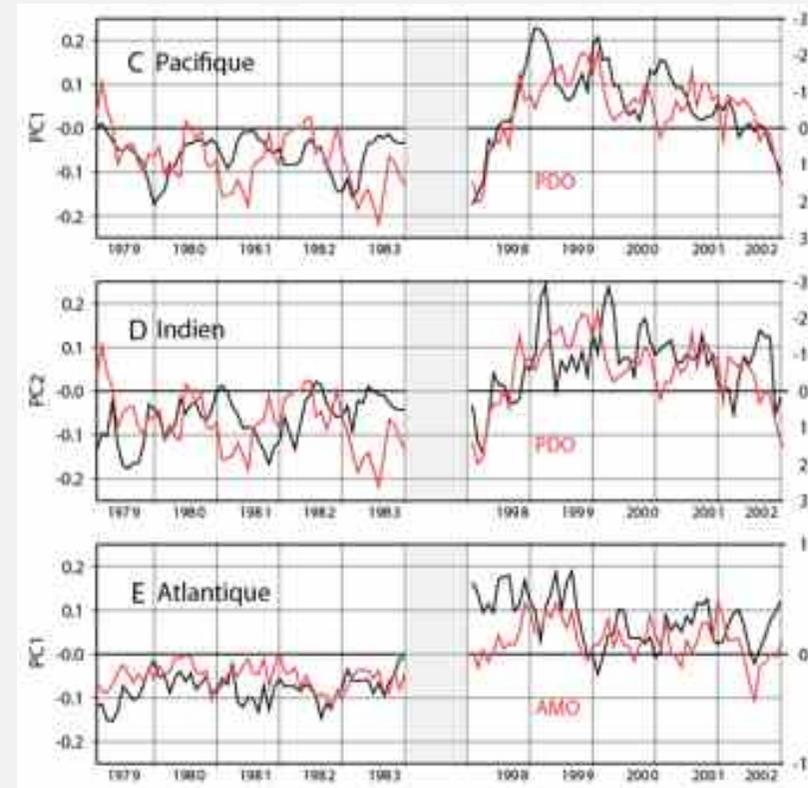
Les études citées jusqu'ici ne fournissent qu'un diagnostic
des changements

Elles n'apportent pas (peu) d'explications des causes
possibles de ces changements

Martinez *et al.*, Science, Vol 326, 27 Nov 2009
 “Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton”



Behrenfeld et al., 2006, Nature

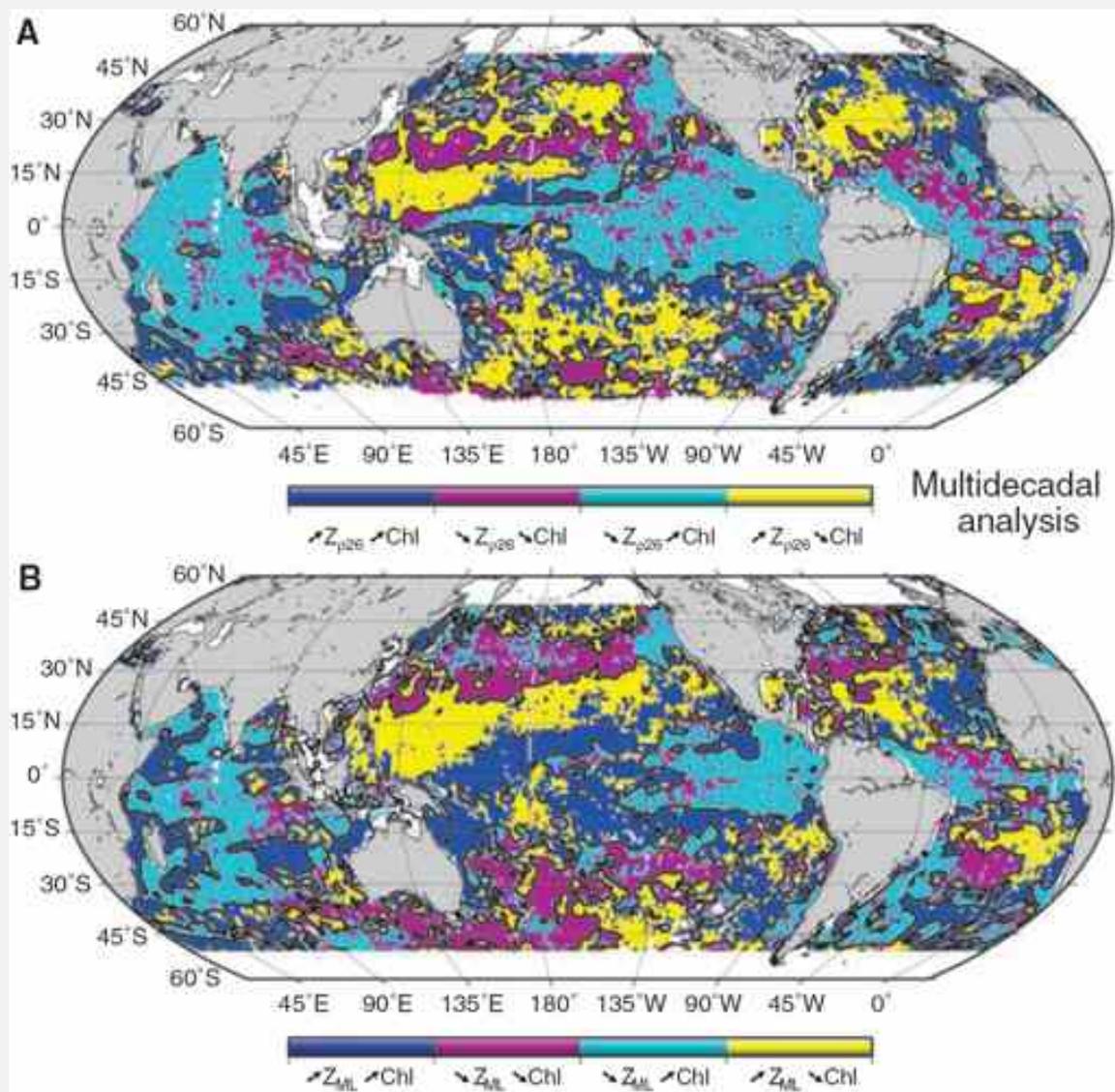


Covariabilité temporelle Chl-SST à partir d’EOFs multivariées (en noir, échelle de gauche) pour 3 bassins océaniques. Les indices PDO et AMO sont superposés (en rouge, échelle de droite).

L’abondance et la distribution du phytoplancton dans le Pacifique et l’atlantique dépend des oscillations décennales des propriétés physiques de ces bassins.

Martinez, E., D. Antoine, F. D’Ortenzio, B. Gentili (2009). Climate-Driven Basin-Scale Decadal Oscillations of Oceanic Phytoplankton. *Science* 326, 1253; doi: 10.1126/science.1177012

Martinez *et al.*, Science, Vol 326, 27 Nov 2009, suite



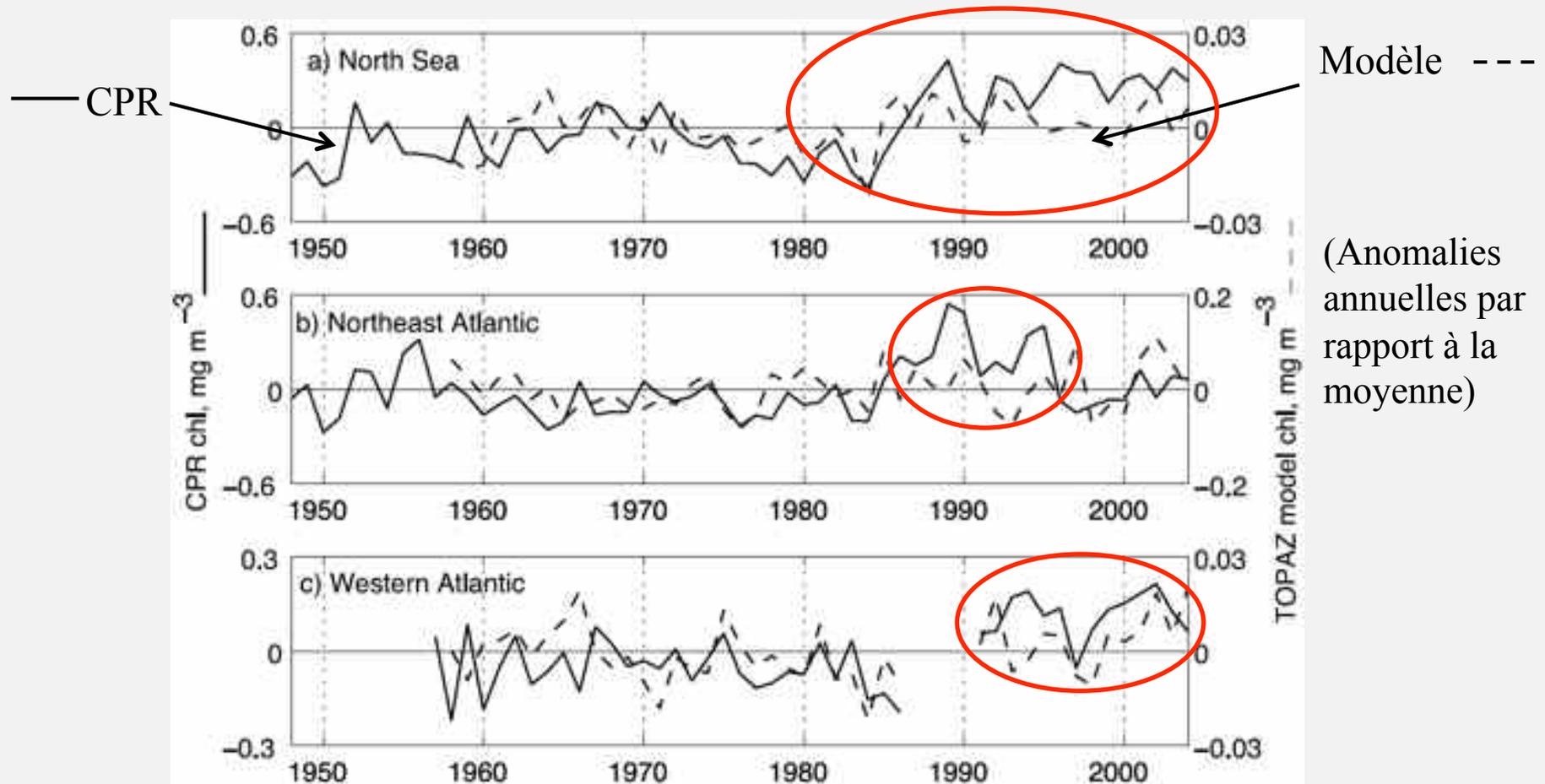
La relation avec
(A) La profondeur de la
nutricline permanente est plus
proche de ce qu'on observe
dans la relation Chl-SST, en
comparaison de la relation avec
la « couche de mélange » (B)

**Quand on s'intéresse aux
échelles multi-décennales, on
doit considérer non seulement
la couche de mélange
« saisonnière » (0-200m) mais
aussi les couches plus
profondes**

Combinaison des données et des modèles

Henson *et al.*, 2009, *Geophys. Res. Letters*, 36

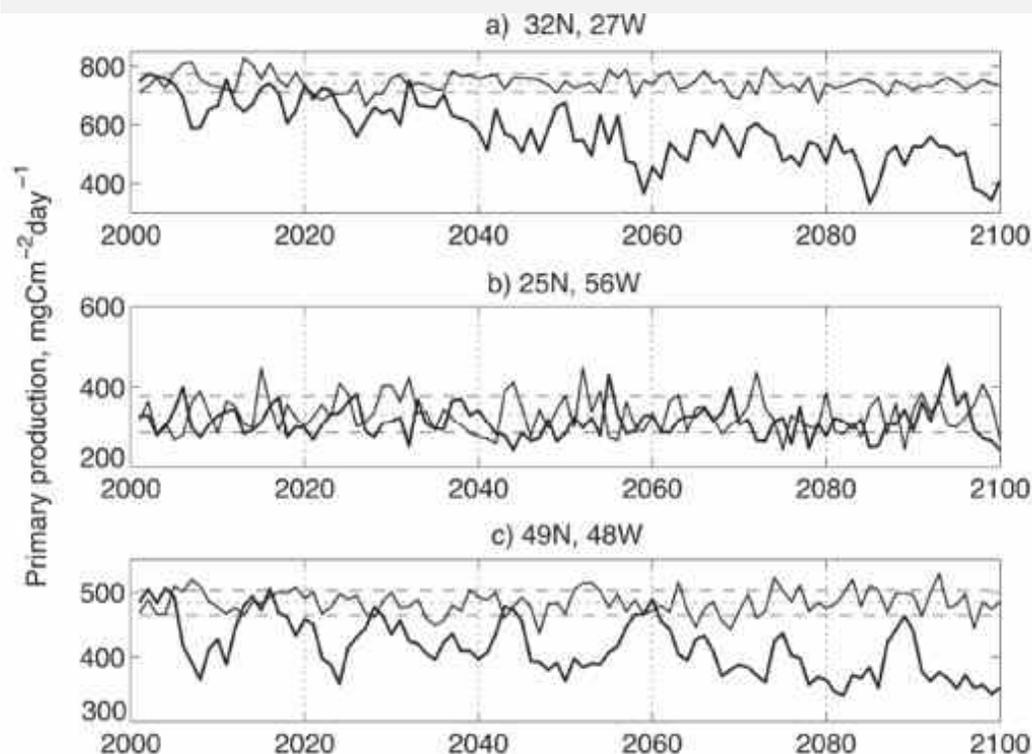
Comparaison entre l'enregistrement du "color index" du CPR recalé avec les données SeaWiFS et les modèles (modèle écosystème TOPAZ intégré dans GFDL MOM-4)



Henson *et al.*: “The model demonstrates skill at reproducing interannual variability, but cannot simulate the regime shifts evident in the PCI data. Comparison of the model output, data and climate indices highlights under-represented processes that it may be necessary to include in future biogeochemical models in order to accurately simulate decadal variability in ocean ecosystems.”

“Détectabilité” des changements induits par les variations du climat

Henson et al., 2010, Biogeosciences, 7, 621–640



Leur fig. 7 (exemple avec le modèle “GFDL”)

Ce qu’ils ont fait:

- 3 modèles couplés physique-écosystème-biogéochimie (GFDL MOM-4/TOPAZ, IPSL NEMO/PISCES, NCAR physical model/CCM-3) sur la période 2001-2100.
- Comparaison de la Chl et de la production via le cas de référence et des cas correspondant à divers scénarios de changement climatique (scenario A2 du rapport 4 du GIEC)

Leurs conclusions:

- La **détection** des changements induits par la variabilité climatique dans les enregistrements de données satellite est **empêchée par la durée trop courte de ces séries et une importante variabilité interannuelle à décennale**.
- Les **changements récemment observés** dans la chlorophylle ou l’extension des zones pauvres de l’océan **ne peuvent pas être attribués de manière non équivoque aux changements climatiques globaux**.
- L’analyse des prévisions des modèles suggère que les changements dus à la variabilité climatique **ne seront pas séparables de la variabilité décennale de manière claire avant 2055**.
- L’ampleur de la variabilité naturelle de la chlorophylle est plus grande, ou au moins similaire, à la tendance due au réchauffement global. Il faut par conséquent **construire un enregistrement homogène, long de plusieurs décennies, pour pouvoir discerner ces effets combinés**

En résumé

Des changements substantiels sont observés sur deux décennies dans la distribution globale et les concentrations de la chlorophylle, ceci essentiellement à partir de l'analyse des enregistrements globaux fournis par les missions CZCS et SeaWiFS

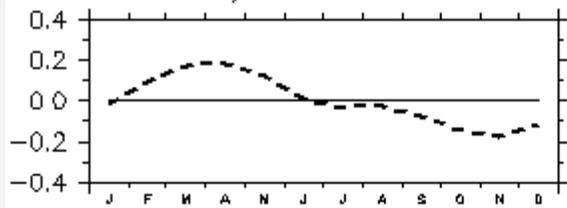
- Ces résultats sont incertains: augmentation générale de ~20% ou diminution de ~6% ?
- Les augmentations sont importantes dans les zones inter-tropicales
- Diminutions dans les zones oligotrophes (et extension de ces zones pendant la période SeaWiFS)
- Changements des cycles saisonniers dans de nombreuses régions
- Oscillations décennales (Chl en fonction de SST)
- Aux échelles (multi)décennales les couches profondes doivent être considérées
- Les modèles ont encore des difficultés à représenter les changements brusques de régimes et les oscillations décennales

Ces changements ne peuvent être reliés sans équivoque aux changements climatiques d'origine humaine

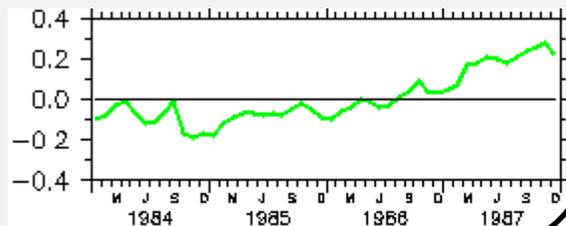
Nos séries d'observations sont simplement trop courtes pour fournir des réponses définitives

Pour progresser...

Saisonnier



Inter-annuel

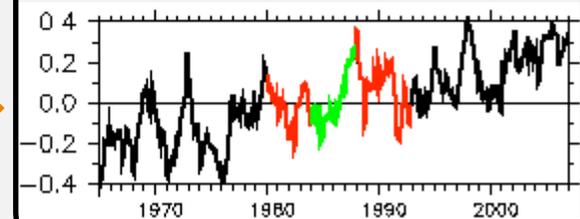


Ce qu'on connaît ("plus ou moins")

On doit en particulier se concentrer sur l'échelle décennale

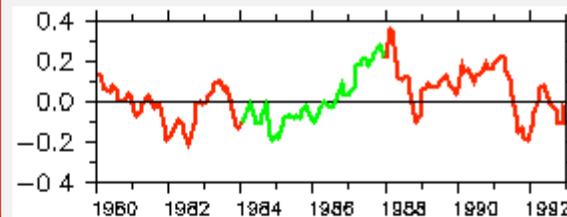


Séculaire



Ce qu'on ne connaît pas

Décennal



A comprendre et caractériser

Pour progresser...

Téledétection « couleur de l'océan »

- Lancement de nouvelles missions spatiales pour prolonger les séries temporelles existantes. Par exemple les missions « sentinelles » de l'Agence spatiale Européenne
- Construction d'enregistrements de « qualité climatique »
 - ◆ Assurer le lancement de missions successives avec recouvrement
 - ◆ Maintenir les sites fixes qui permettent d'établir de longues séries de mesures de terrain pour l'étalonnage des observations satellitaires
 - ◆ Améliorer l'étalonnage des instruments et les techniques de traitement des données

Modélisation

- Les modèles devraient permettre une meilleure représentation des changements brusques de régimes et des oscillations décennales de l'environnement physique
- Les modèles d'écosystème devraient être plus « dynamiques », afin de mieux représenter la réponse des écosystèmes aux changements physiques

Merci de votre attention



Image ©: ESA, - J. Huart, 2008

A lire

- « Influence des oscillations climatiques décennales des bassins océaniques sur le phytoplancton ». Article paru sur le « web INSU », Décembre 2009:
http://www.insu.cnrs.fr/a3307_influence-oscillations-climatiques-decennales-bassins-oceaniques-phytoplancton.html
- « L'océan perd sa chlorophylle » *La Recherche*, N°448, janvier 2011; par F. Heimbürger
- « Le plancton sous surveillance », *Le Monde*, édition du Samedi 19 février 2011; par S. Foucart
- « Mesurer la désertification des océans », Journal du CNRS, juin 2008, disponible à:
<http://www2.cnrs.fr/journal/3908.htm>
- Antoine D., 1998, Apports de la télédétection spatiale de la couleur de l'océan à l'océanographie, *Océanis* 24, 81-150.
- Antoine D., 2006. Global- and Ocean-scale primary production from satellite observations, In "Manual of Remote Sensing, 3rd edition, volume 6, Remote Sensing of the Marine environment", J.F.R. Gower Ed., ASPRS pub., Bethesda, MD, 85-147.
- ...

Quelques liens web

- <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (site « couleur de l'océan » de la NASA)
- <http://envisat.esa.int> (mission ENVISAT de l'ESA)
- <http://www.globcolour.info> (projet de fusion de données couleur de l'océan)
- <http://www.gis-cooc.org> (groupement d'intérêt scientifique « couleur de l'océan »)
- <http://www.obs-vlfr.fr/LOV/OMT/> (équipe optique marine et télédétection du LOV)
- <http://www.ioccg.org> (International Ocean Color Coordinating Group)
- <http://www.esa-oceancolour-cci.org> (projet « climate change initiative » de l'ESA)
- <http://www.obs-vlfr.fr/Boussole> (projet BOUSSOLE: optique marine in situ)
- http://www.esa.int/esaLP/SEMTST4KXMF_LPgmes_0.html (mission sentinelle 3, ESA)
- ...

Références citées dans la présentation

- Antoine, D., J.M. André, and A. Morel (1996), Oceanic primary production : II. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, *Global Biogeochem. Cycles* 10, 57-69.
- Antoine, D., Morel, A., Gordon, H.R., Banzon, V.F. and R.H. Evans (2005) Bridging ocean color observations of the 1980's and 2000's in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 110, C06009, doi:10.1029/2004JC002620.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski, Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnology and Oceanography* 42, 1-20, 1997.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M., Boss, E.S., 2006. Climate- driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444, 752–755
- Behrenfeld, MJ, E. Boss, D. A. Siegel, and D. M. Shea, 2005, Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space, *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1006, doi: 10.1029/2004GB002299
- Boyce, D.G., Lewis, M.R., Worm, B., 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596.
- Carr, M.-E., M.A.M. Friedrichs, M. Schmeltz, M.N. Aité, D. Antoine, K.R. Arrigo, I. Asanuma, O. Aumont, R. Barber, M. Behrenfeld, R. Bidigare, E. Buitenhuis, J. Campbell, A. Ciotti, H. Dierssen, M. Dowell, J. Dunne, W. Esaias, B. Gentili, S. Groom, N. Hoepffner, J. Hishisaka, T. Kameda, C. LeQuéré, S. Lohrenz, J. Marra, F. Mélin, K. Moore, A. Morel, T. Reddy, J. Ryan, M. Scardi, T. Smyth, K. Turpie, G. Tilstone, K. Waters, Y. Yamanaka (2005) A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color, *Deep-Sea Research, Part II*, 53, 741-770
- Doney, S.C. (2006), *Oceanography: Plankton in a warmer world*, *Nature*, 444, 695-696, doi:10.1038/444695a.
- Falkowski, P.G., and C. Wilson, 1992, Phytoplankton productivity in the north Pacific ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO₂, *Nature*, 358, 741-743.
- Gregg W.W. and M.E. Conkright (2001), Global seasonal climatologies of ocean chlorophyll : blending in situ and satellite data for the Coastal Zone Color Scanner era, *J. Geophys. Res.*, 106, 2499-2515.
- Gregg W.W. and M.E. Conkright (2002), Decadal changes in global ocean chlorophyll, *Geophys. Res. Letters*, 29, 10.10129/2002GL014689.
- Gregg W.W., M.E. Conkright, J.E. O'Reilly, F.S. Patt, M. Wang, J.A. Yoder and N.W. Casey (2002), NOAA-NASA Coastal Zone Color Scanner reanalysis effort, *Appl. Opt.*, 41, 1615-1628.
- Guieu C., Duce R. and Arimoto R., 1994, Dissolved input of manganese to the Ocean: Aerosol Source, *Journal of Geophysical Research*, 99, 18789-18800.
- Henson, S. A., D. Raitsos, J. P. Dunne, and A. McQuatters-Gollop, Decadal variability in biogeochemical models: Comparison with a 50-year ocean colour dataset, *Geophysical Research Letters*, 36, L21601, doi:10.1029/2009GL040874, 2009.
- Henson, S. A., J. L. Sarmiento, J. P. Dunne, L. Bopp, I. Lima, S. C. Doney, J. John, and C. Beaulieu, Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity, *Biogeosciences*, 7, 621–640, 2010.
- Hirawake, T., T. Odate, and M. Fukuchi, Long-term variation of surface phytoplankton chlorophyll a in the Southern Ocean during 1965–2002, *Geophysical Research Letters*, 32, L05606, doi: 10.1029/2004GL021394, 2005.
- Irwin A.J., and M.J. Oliver, Are ocean deserts getting larger?, *Geophysical Research Letters*, 36, L18609, doi:10.1029/2009GL039883, 2009.
- Karl, D.M., R.R. Bidigare, R.M. Letelier, Long-term changes in plankton community structure and productivity in the North Pacific Subtropical Gyre: The domain shift hypothesis, *Deep-Sea Research II* 48 (2001) 1449-1470.
- Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T. and C. Caverhill (1995)., An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *J. Plankton Res.* 17: 1245-1271.
- Mackas, D.L., Does blending of chlorophyll data bias temporal trends , *Nature*, vol 472, 14 Avril 2011.
- Martinez E., D. Antoine, F. D'Ortenzio and B. Gentili (2009). Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton, *Science*, 326, 1253-1256.
- Marty, J.-C., J. Chiaverini, M.-D. Pizay, and B. Avril, Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991–1999), *Deep-Sea Research II* 49 (2002) 1965–1985.
- McQuatters-Gollop et al., Is there a decline in marine phytoplankton , *Nature*, vol 472, 14 Avril 2011.
- Polovina, J.J., Howell, E.A., Abecassis, M., 2008. Ocean's least productive waters are expanding. *Geophysical Research Letters* 35, L03618. doi:10.1029/2007GL031745
- Raitsos, D.E., P. C. Reid, S. J. Lavender, M. Edwards, and A. J. Richardson, Extending the SeaWiFS chlorophyll data set back 50 years in the northeast Atlantic, *Geophysical Research Letters*, 32, L06603, doi:10.1029/2005GL022484, 2005
- Rybczakowski, R.R. and J.P. Dunne. A measured look at ocean chlorophyll trends, *Nature*, vol 472, 14 Avril 2011.
- Suttle, C.A. Marine viruses – major players in the global ecosystem. *Nat. Rev. Microbiol.* 5, 801–812 (2007).
- Venrick, E.L., J. A. McGowan, D. R. Cayan, T. L. Hayward, 1987, Climate and Chlorophyll a: Long-Term Trends in the Central North Pacific Ocean, *Science*, 238, 70-72