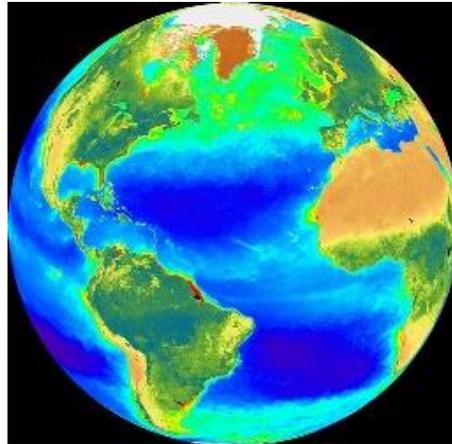
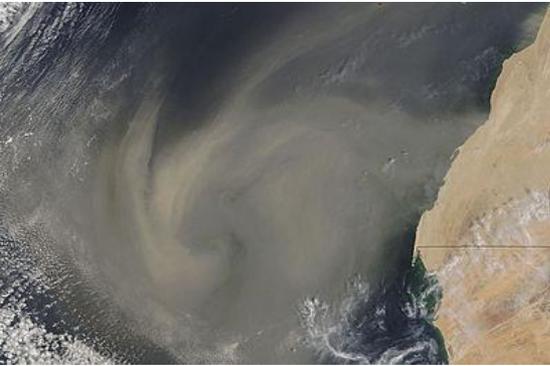


# Un grain de sable dans la pompe océanique de carbone

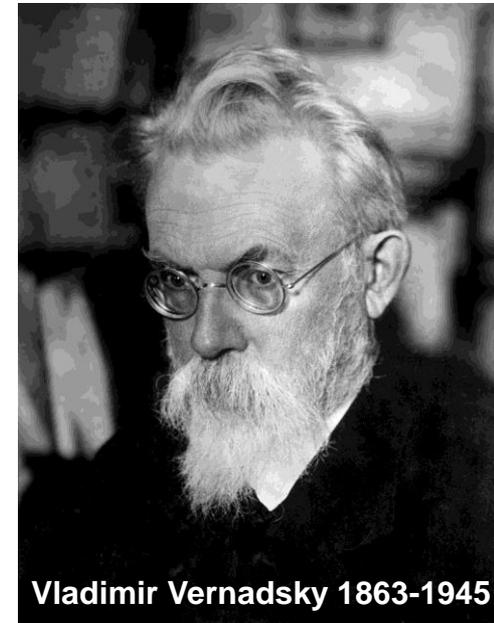
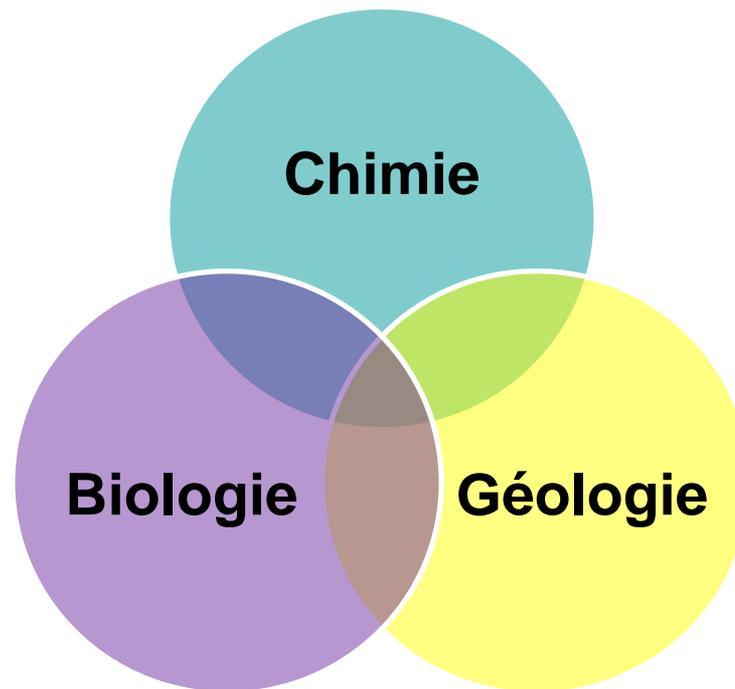


**Elvira Pulido-Villena**

Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) – OSU Pytheas

# Biogéochimie

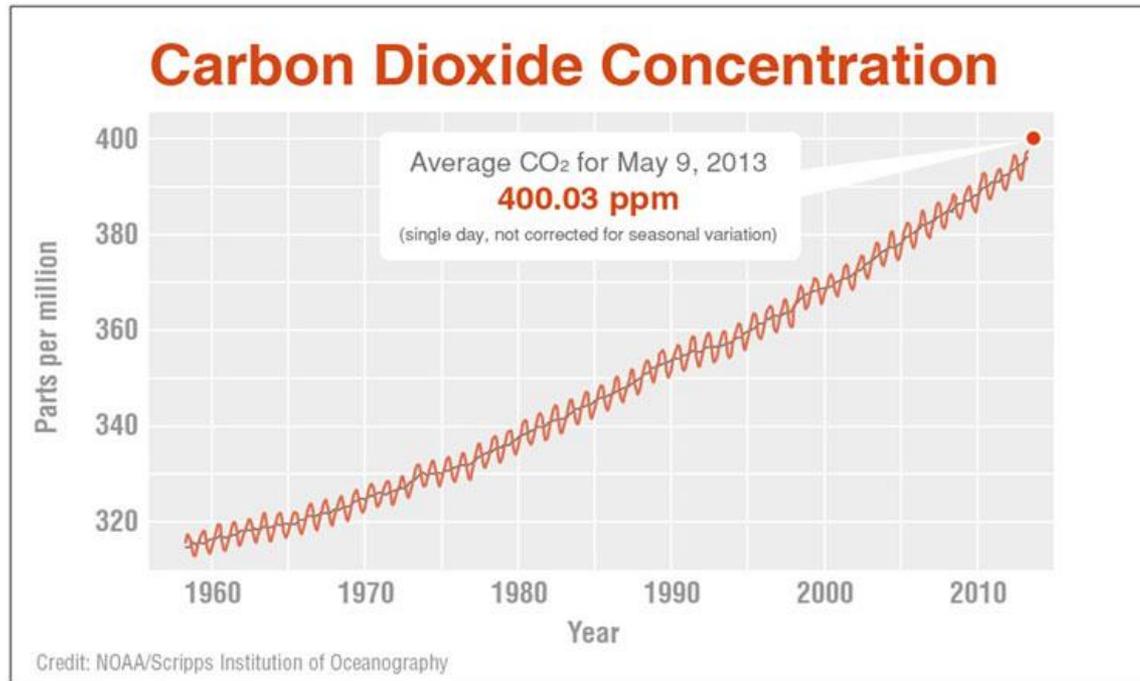
La Biogéochimie (Vernadsky, 1926) est une discipline scientifique qui explore les processus et réactions physiques, chimiques, biologiques et géologiques qui gouvernent la composition et les modifications de l'environnement naturel



Vladimir Vernadsky 1863-1945

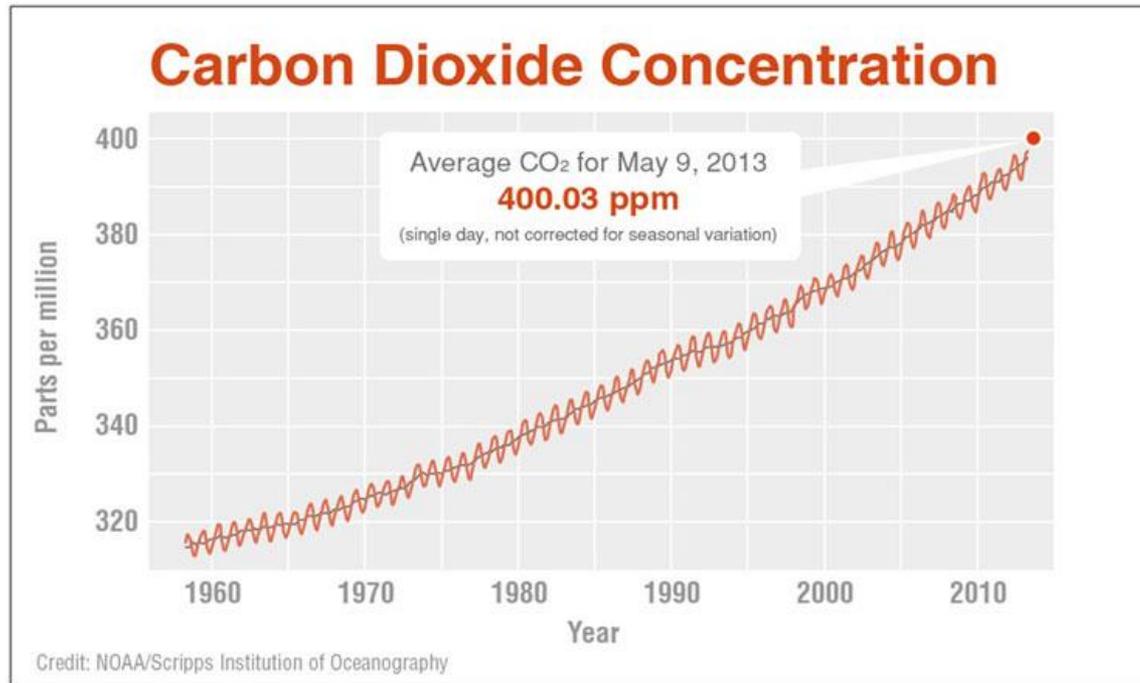
# L'océan: une pompe à carbone

Alors que le cycle global du carbone était à peu près équilibré avant les débuts de l'ère industrielle, le CO<sub>2</sub> atmosphérique a augmenté de près de 40% au cours des 200 dernières années



# L'océan: une pompe à carbone

Alors que le cycle global du carbone était à peu près équilibré avant les débuts de l'ère industrielle, le CO<sub>2</sub> atmosphérique a augmenté de près de 40% au cours des 200 dernières années



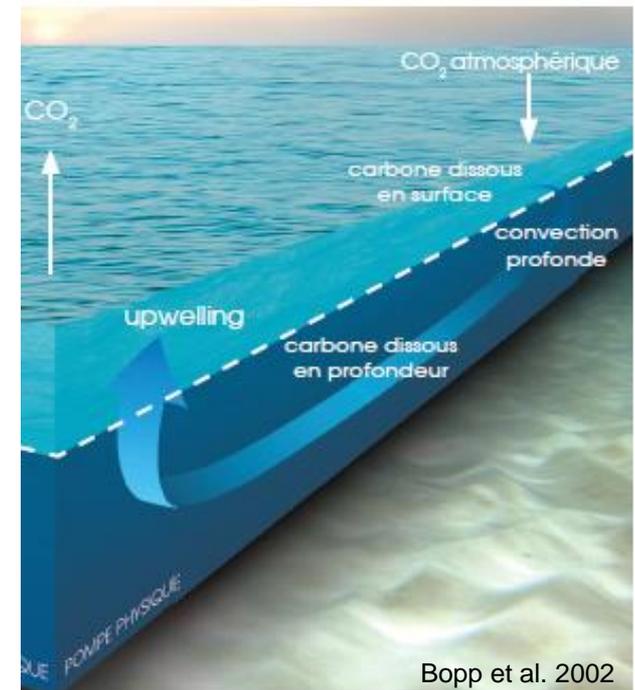
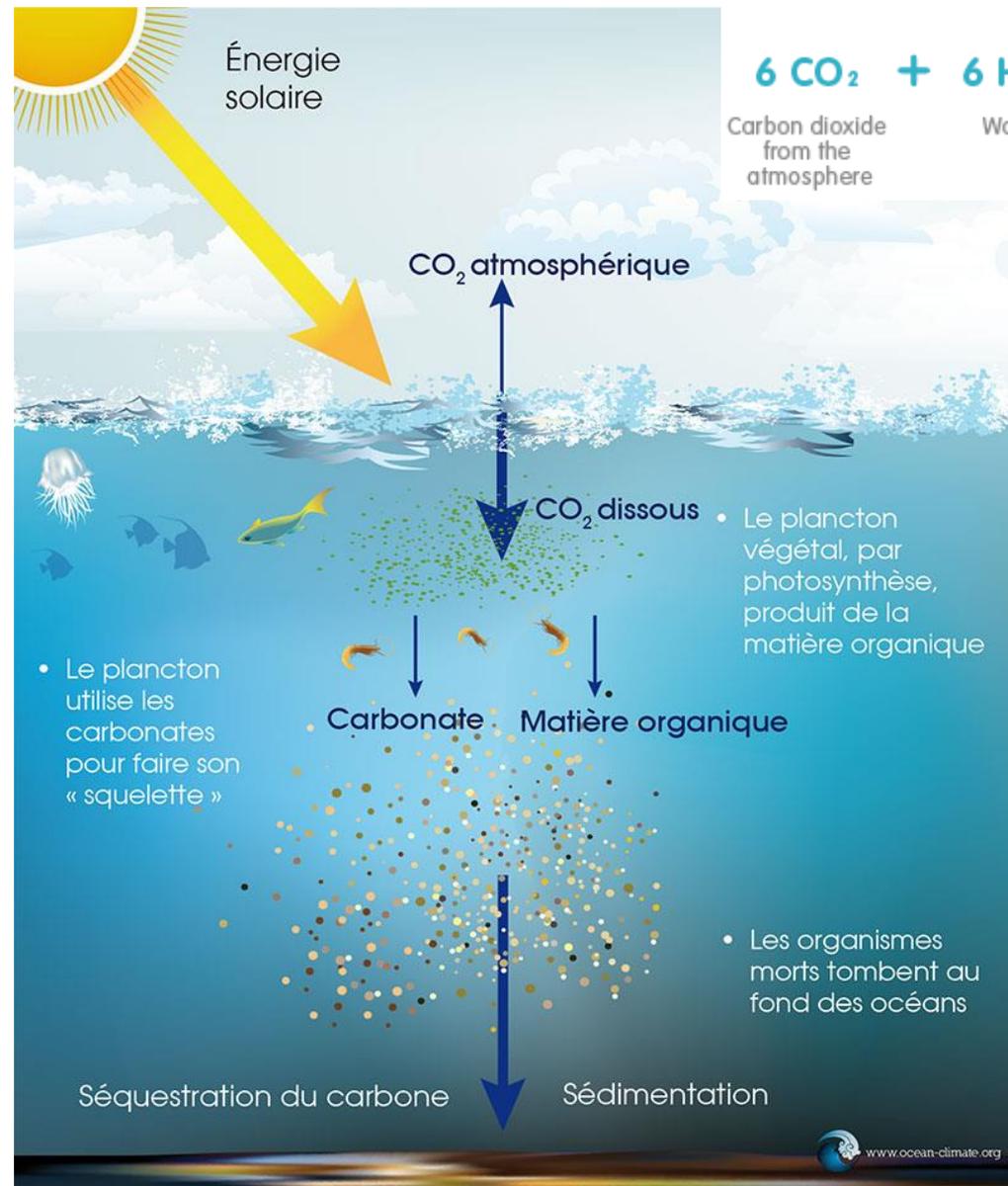
Au cours des dernières décennies, l'océan a ralenti le rythme du changement climatique anthropique en absorbant près de 30% des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>

# L'océan: une pompe à carbone



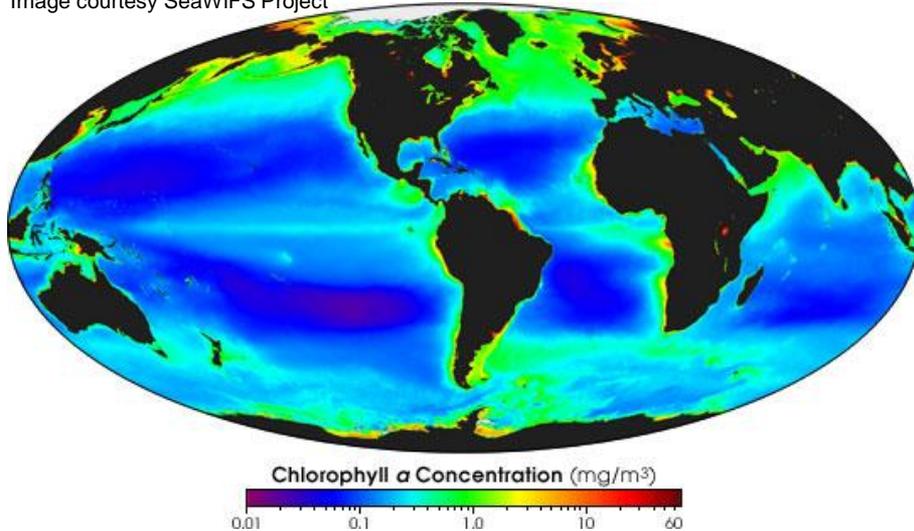
## Pompe biologique

## Pompe physique



# L'importance des éléments nutritifs

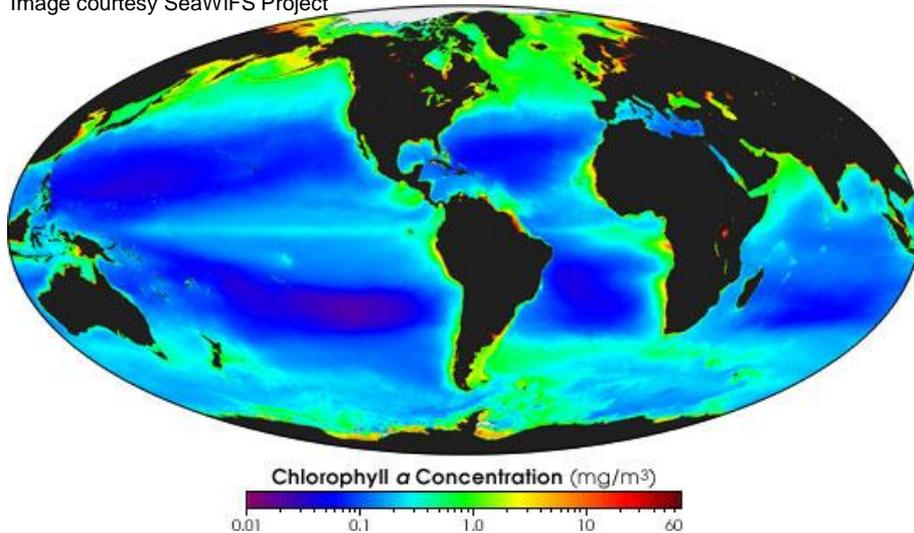
Image courtesy SeaWiFS Project



Des vastes zones de l'océan sont caractérisées par une faible biomasse phytoplanctonique

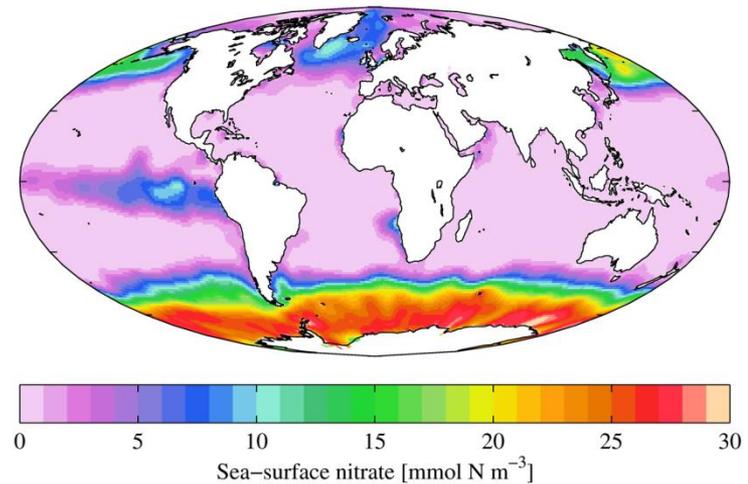
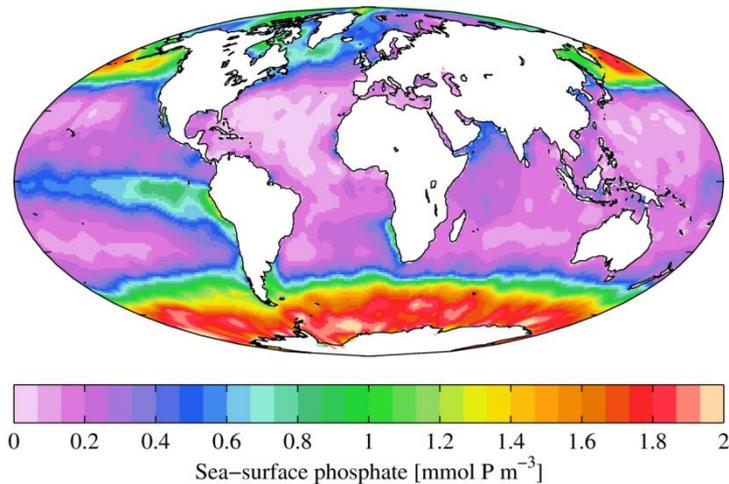
# L'importance des éléments nutritifs

Image courtesy SeaWiFS Project



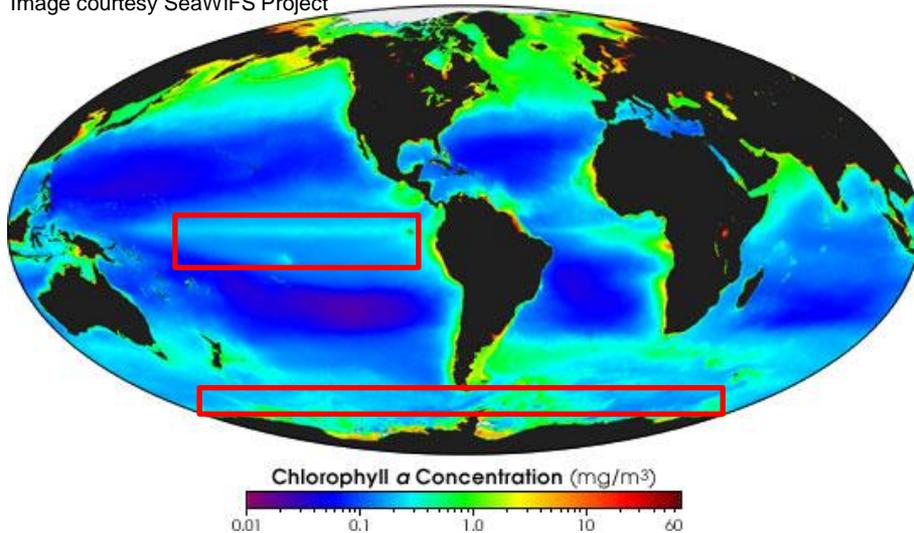
Des vastes zones de l'océan sont caractérisées par une faible biomasse phytoplanctonique

Dans ces régions, dites oligotrophes, l'activité phytoplanctonique est limitée par la disponibilité en macronutriments, notamment l'azote et le phosphore

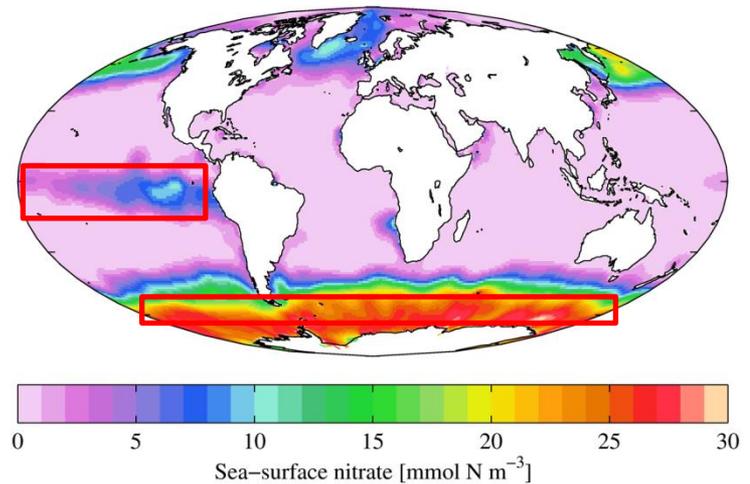
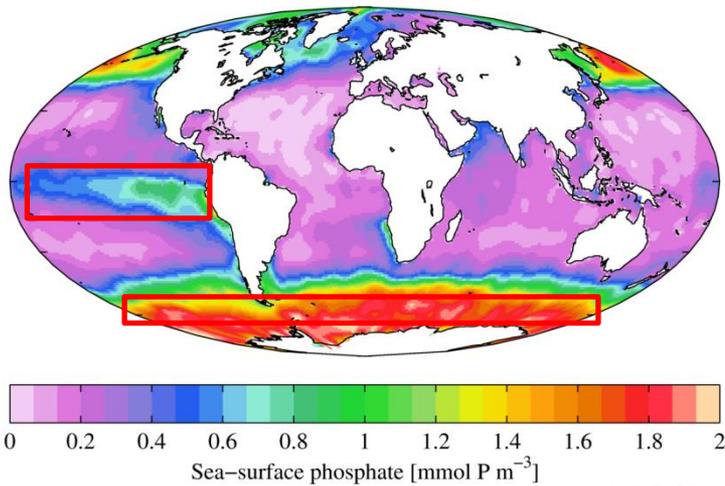


# L'importance des éléments nutritifs

Image courtesy SeaWiFS Project

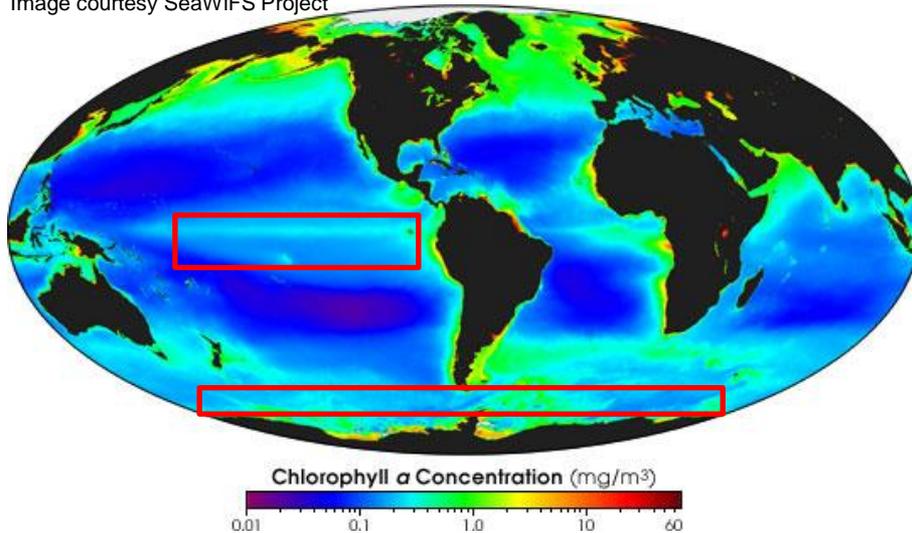


D'autres régions montrent des eaux de surface riches en macronutriments mais elles sont pourtant faiblement productives



# L'importance des éléments nutritifs

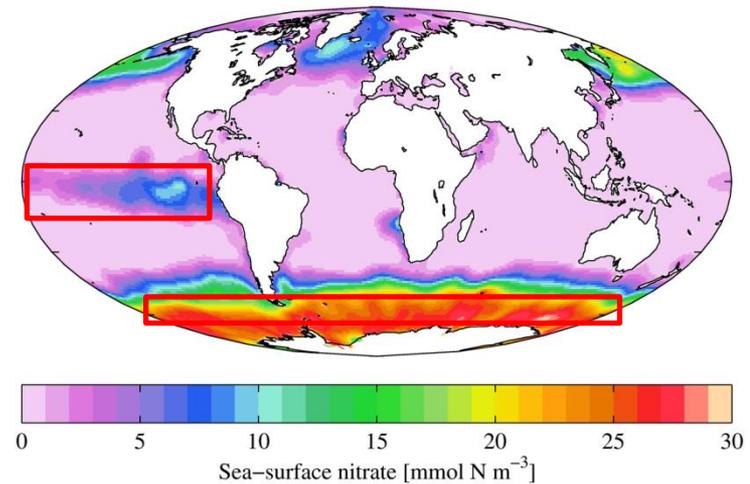
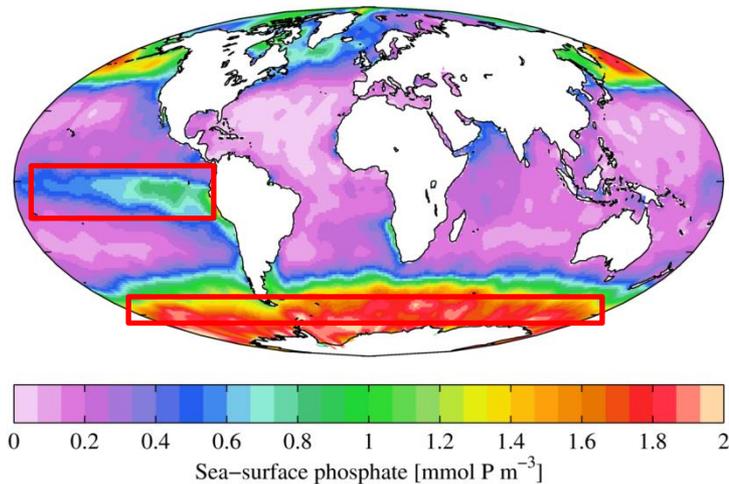
Image courtesy SeaWiFS Project



D'autres régions montrent des eaux de surface riches en macronutriments mais elles sont pourtant faiblement productives



**Rôle crucial du fer dans le contrôle de la production primaire océanique (J. H. Martin's Iron Hypothesis)**



# Sources d'éléments nutritifs

- ❑ Fleuves qui déversent dans les eaux littorales
- ❑ Lessivage des sédiments en zone côtière
- ❑ Remonté des eaux profondes plus riches
- ❑ Voie éolienne

# Sources d'éléments nutritifs

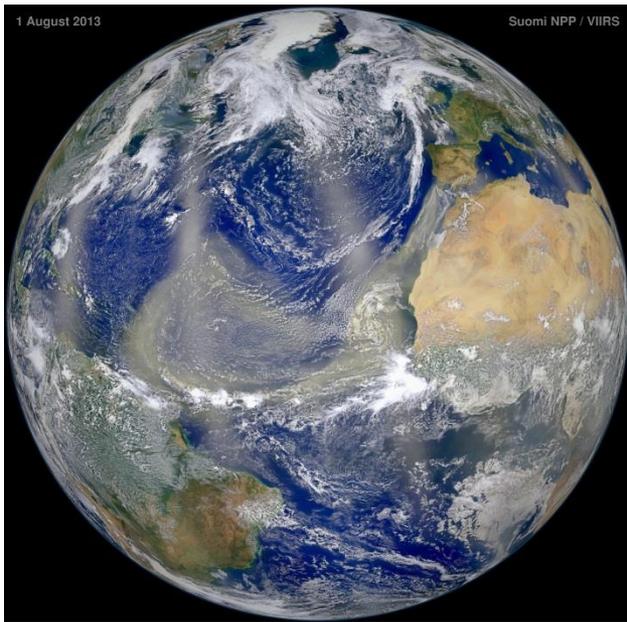
- ❑ Fleuves qui déversent dans les eaux littorales
- ❑ Lessivage des sédiments en zone côtière
- ❑ Remonté des eaux profondes plus riches
- ❑ Voie éolienne

	Northern Hemisphere	Southern Hemisphere	Global	Low	High
Carbonaceous aerosols					
Organic Matter (0–2 µm)					
Biomass burning	28	26	54	45	80
Fossil fuel	28	0.4	28	10	30
Biogenic (>1µm)	—	—	56	0	90
Black Carbon (0–2 µm)					
Biomass burning	2.9	2.7	5.7	5	9
Fossil fuel	6.5	0.1	6.6	6	8
Aircraft	0.005	0.0004	0.006		
Industrial Dust, etc. (> 1 µm)			100	40	130
Sea Salt					
d< 1 µm	23	31	54	18	100
d=1–16µm	1,420	1,870	3,290	1,000	6,000
Total	1,440	1,900	3,340	1,000	6,000
Mineral (Soil) Dust <sup>b</sup>					
d< 1 µm	90	17	110	—	—
d=1–2µm	240	50	290	—	—
d=2–20µm	1,470	282	1,750	—	—
Total	1,800	349	2,150	1,000	3,000

Le dépôt d'aérosols est la source principale d'éléments nutritifs tels que le P et le Fe à la surface de l'océan à l'échelle globale

Le sel de mer et les poussières terrigènes sont les deux principales sources d'aérosols dans l'atmosphère

# Les poussières désertiques



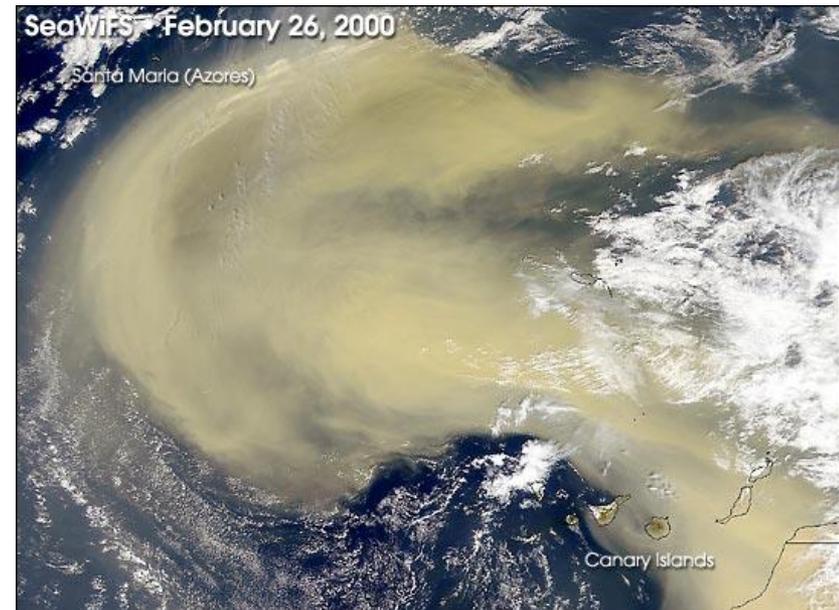
Particules minérales soulevées de la surface de sols par l'action de l'érosion éolienne



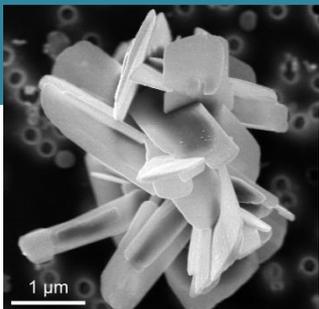
Région du Sahara-Sahel → Méditerranée, Atlantique Nord  
Autres sources: Chine, Moyen Orient, Patagonie, Australie

Images Earth Observatory, NASA

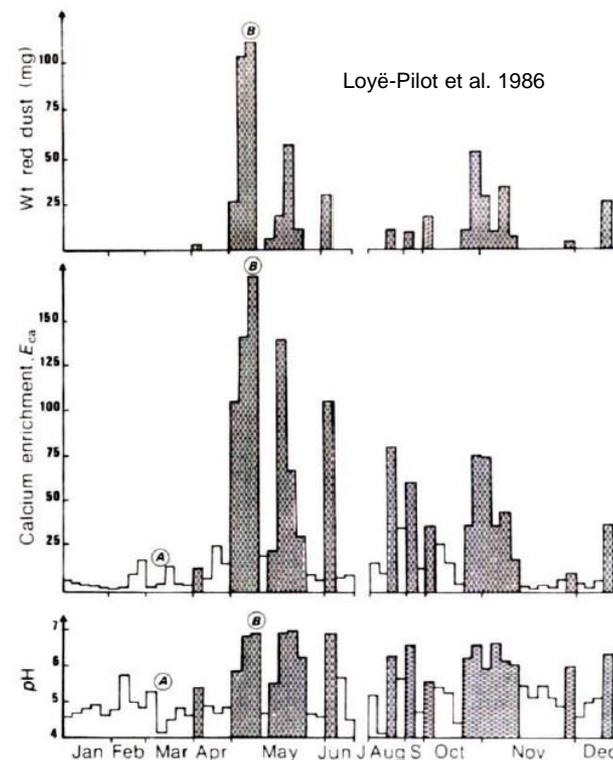
**Des grandes quantités de  
particules transportées à  
des milliers de kilomètres**



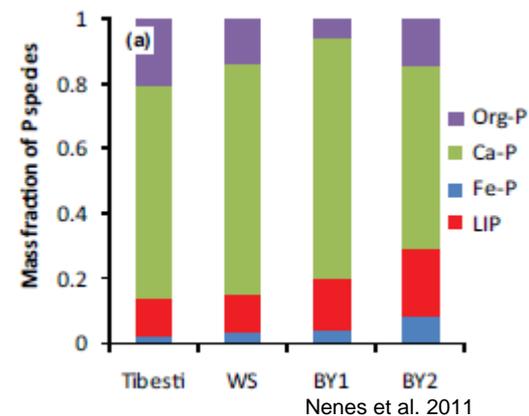
# Les poussières désertiques



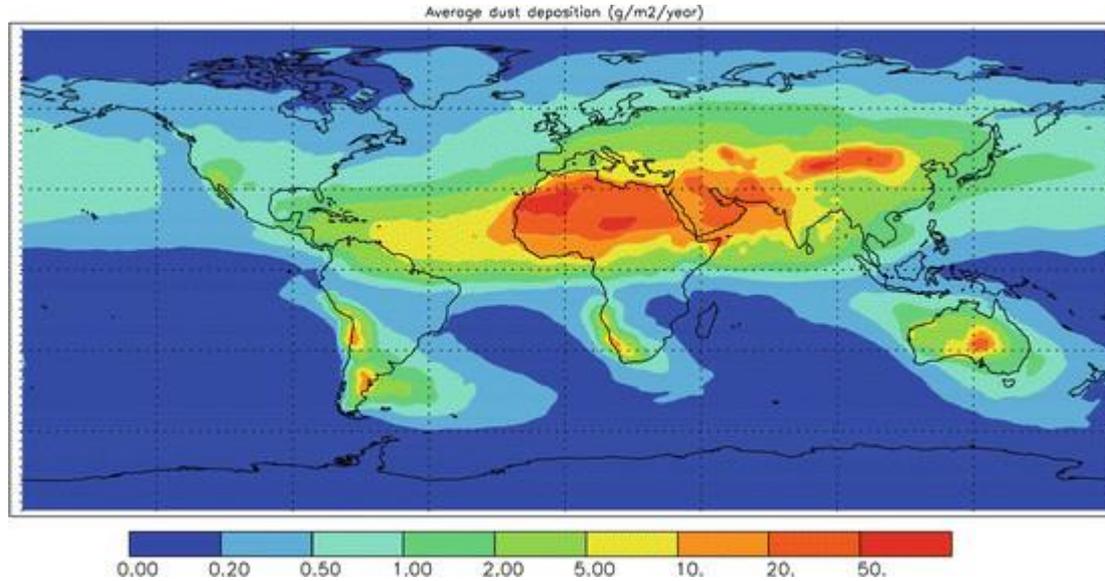
- ❑ Croûte terrestre:  $\text{SiO}_2$  (60%) +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (6-16%)
- ❑ Argiles et minéraux de quartz
- ❑ Teneur élevé en carbonates
- ❑ (Hydro)xydes de **fer** (3.5%)
- ❑ **Phosphore** (apatite + P-Fe-hydroxydes Fe)



Guieu et al. 2002	Sample Label	Al, %	Fe, %	Phosphorus, %	Pb, ppm
<i>Saharan Particles: Coarse Fractions</i>					
Tomadin et al. [1984]	(collected on meshes)	8.2	5.6	0.080	-
		6.8	3.7	0.180	-
Guieu and Thomas [1996]	soils: fraction < 50 μm	7.4	4.6	0.360	26
Herut et al. [1999]	soils: fraction < 63 μm	3.4	2.3	0.039	-
<i>Crustal References</i>					
Mason [1982]	upper crust	8.1	5.0	0.105	13
Martin and Withfield [1983]	erodible crust	6.9	3.6	0.061	16
Taylor and Mc Lennan [1985]	upper crust	8.0	3.5	0.105	-
Wedepohl [1995]	average composition of the upper crust	7.7	3.1	0.067	17

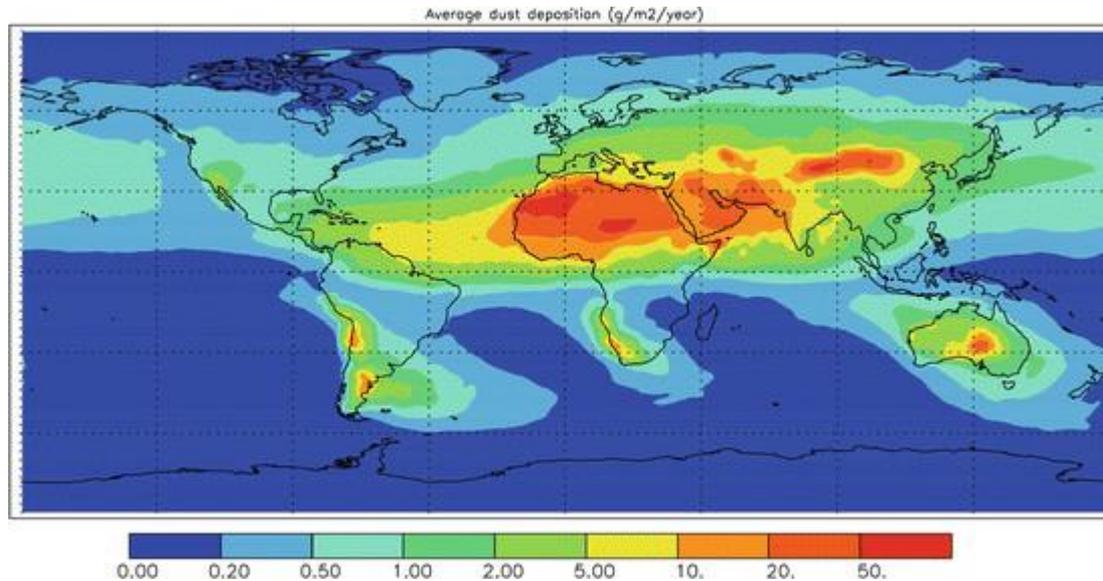


# Dépôt de poussières sur la surface de l'océan

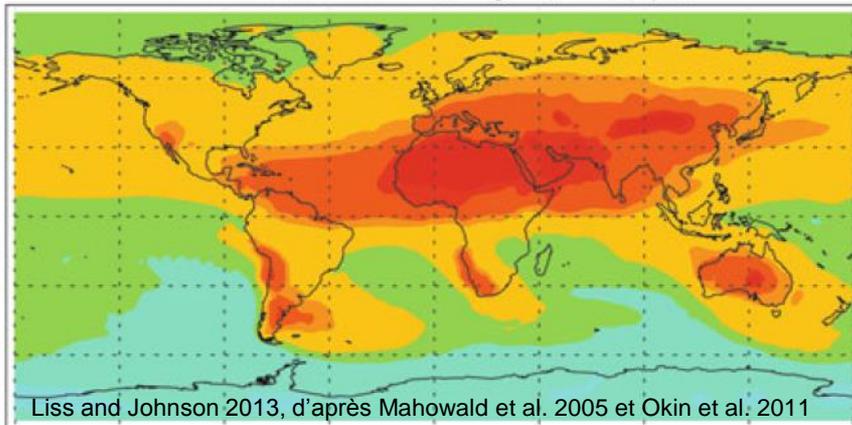


Jickells et al. 2005

# Dépôt de poussières sur la surface de l'océan

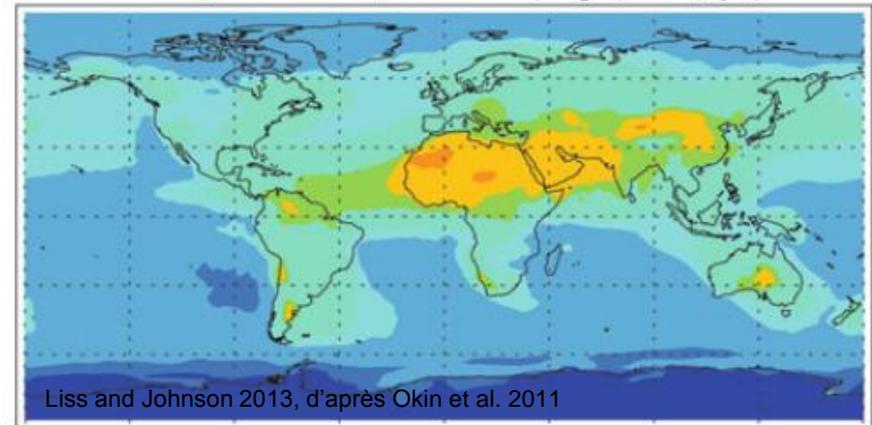


Iron deposition (mgFe/m<sup>2</sup>/yr)



Les aérosols désertiques sont la principale source éolienne de fer

Phosphorus deposition (mgP/m<sup>2</sup>/yr)



Les aérosols désertiques sont la principale source éolienne de P mais la composante anthropique est importante



# Rôle des poussières désertiques sur le cycle océanique du C

# Rôle des poussières désertiques sur le cycle océanique du C

Partition dissous/particulaire: concept physico-chimique crucial en biogéochimie

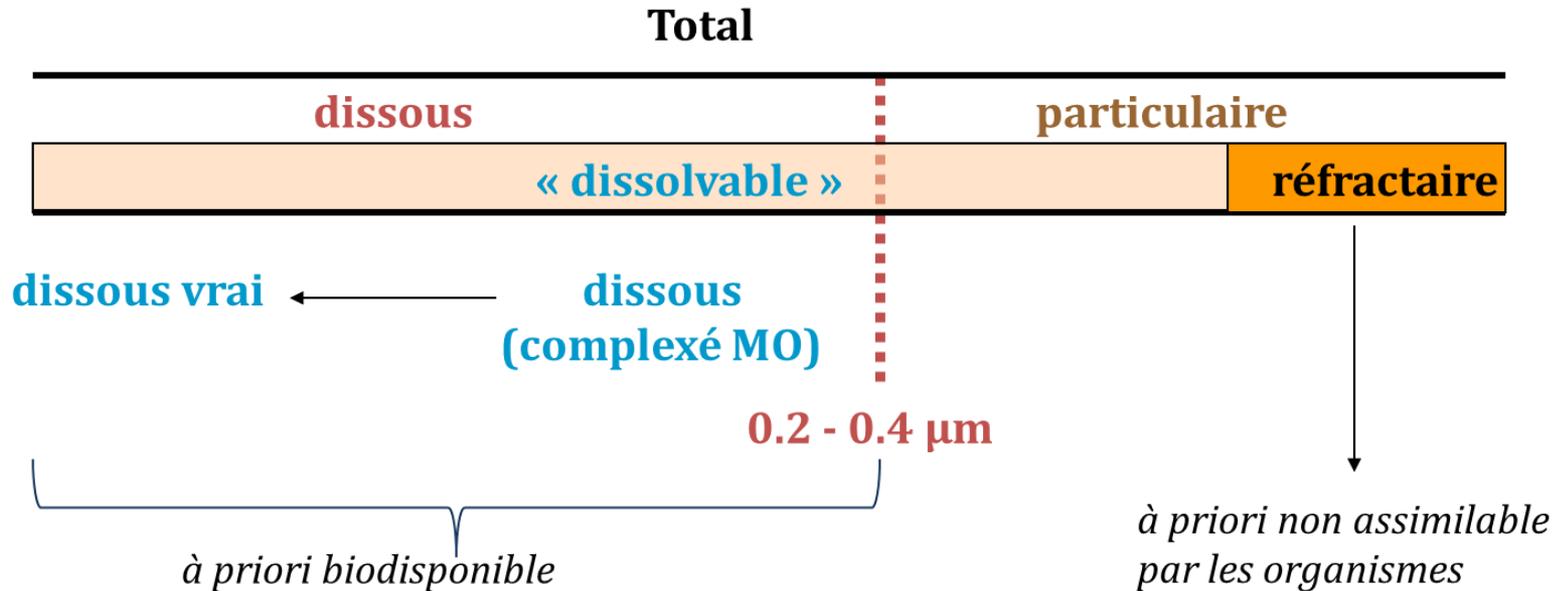


Illustration courtoisie C. Guieu

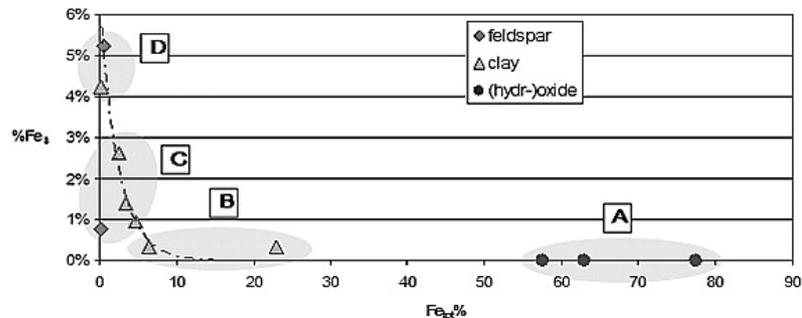
La **solubilité** des éléments associés aux poussières désertiques est une variable clé dans le rôle de ces apports sur la pompe océanique de carbone

# Solubilité des poussières désertiques

- ❑ Facteurs « pré-dépôt »: minéralogie (source), transport, mélange
- ❑ Facteurs « dépôt »: mode, charge particulaire
- ❑ Facteurs « post-dépôt »: activité biologique océanique (ligands du fer)

# Solubilité des poussières désertiques

- ❑ Facteurs « pré-dépôt »: minéralogie (source), transport, mélange
- ❑ Facteurs « dépôt »: mode, charge particulaire
- ❑ Facteurs « post-dépôt »: activité biologique océanique (ligands du fer)

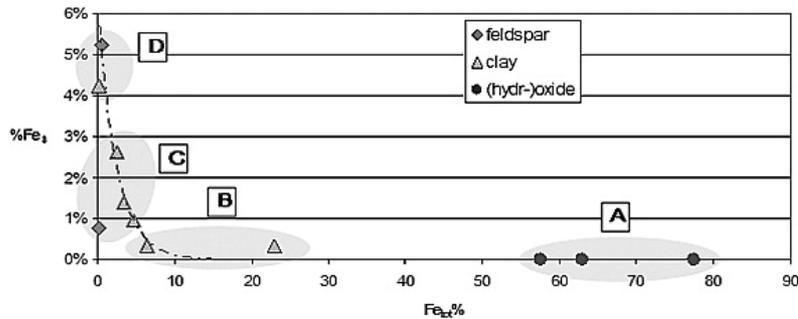


## Effet de la minéralogie sur la solubilité du Fe

Pourcentage de fer soluble (%Fe<sub>s</sub>) en fonction de la teneur total en fer du minéral (Fe<sub>tot</sub> in %).

# Solubilité des poussières désertiques

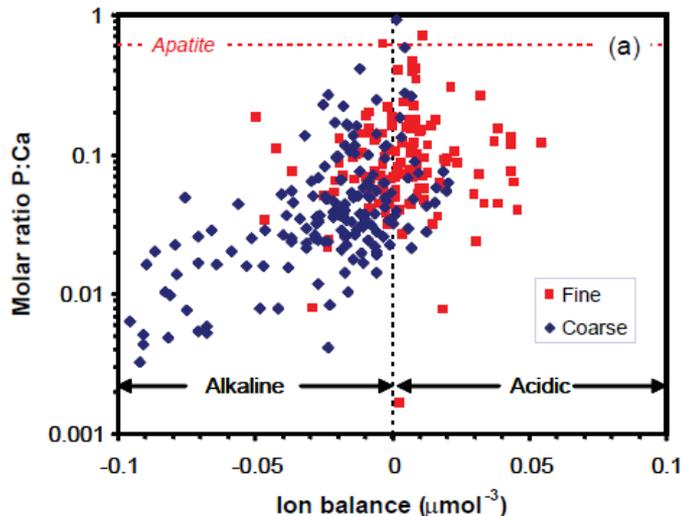
- ❑ Facteurs « pré-dépôt »: minéralogie (source), transport, mélange
- ❑ Facteurs « dépôt »: mode, charge particulaire
- ❑ Facteurs « post-dépôt »: activité biologique océanique (ligands du fer)



## Effet de la minéralogie sur la solubilité du Fe

Pourcentage de fer soluble ( $\%Fe_s$ ) en fonction de la teneur total en fer du minéral ( $Fe_{tot}$  in %).

Journet et al. 2008



## Effet du transport sur la solubilité du P

Aérosols prélevés en Méditerranée Orientale: la quantité de P solubilisé augmente avec l'acidité (rencontre avec des masses d'air polluées) et la distance de la source

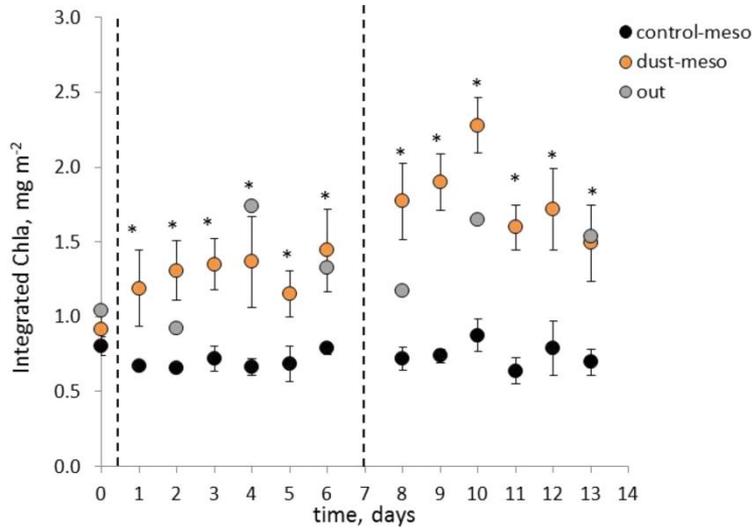
Nenes et al. 2011

# Rôle des poussières désertiques sur le cycle océanique du C

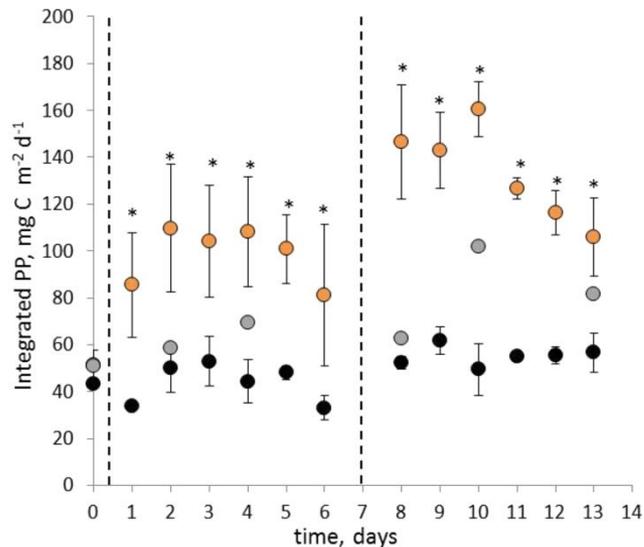
Réponse biologique à l'apport d'éléments nutritifs par voie éolienne

# Rôle des poussières désertiques sur le cycle océanique du C

## Réponse biologique à l'apport d'éléments nutritifs par voie éolienne

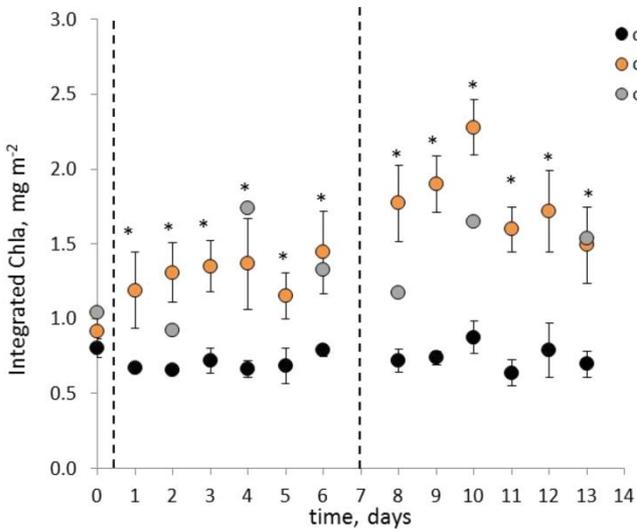


← Stimulation significative de l'activité phytoplanctonique suite à un ajout artificiel de poussières désertiques dans des mésocosmes en Méditerranée (projet DUNE)

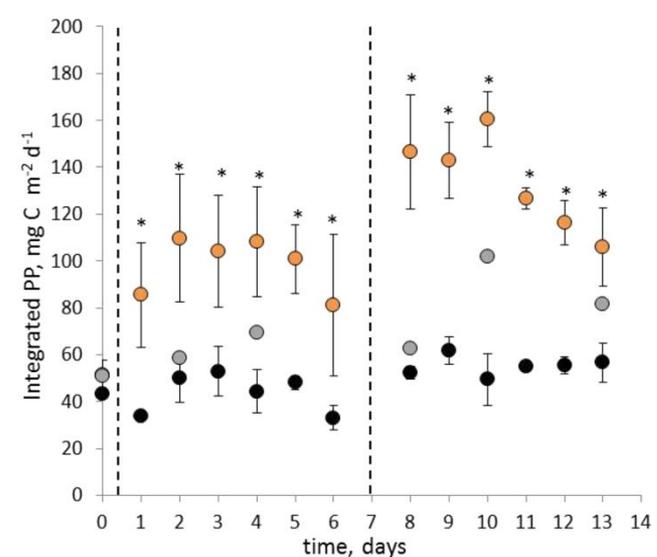


# Rôle des poussières désertiques sur le cycle océanique du C

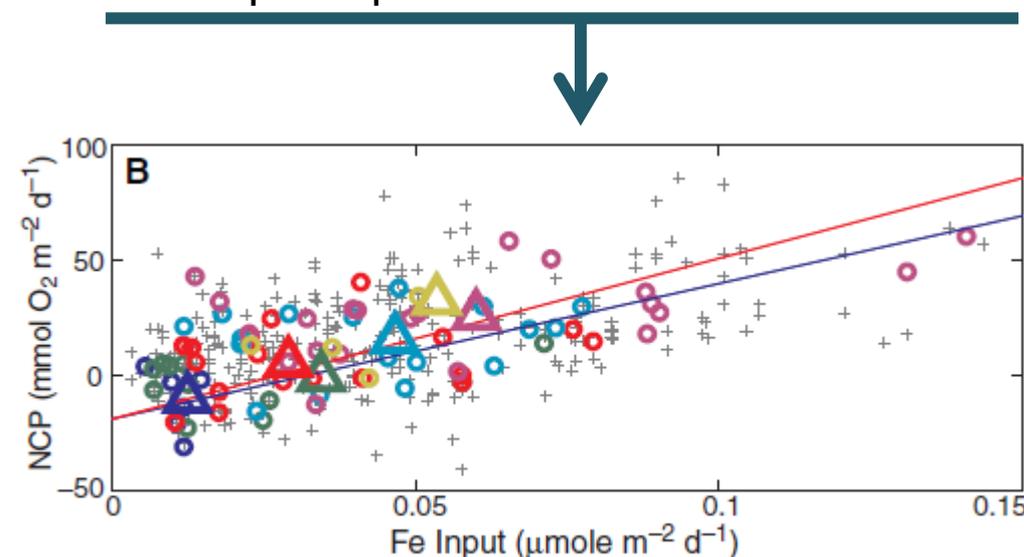
## Réponse biologique à l'apport d'éléments nutritifs par voie éolienne



← Stimulation significative de l'activité phytoplanctonique suite à un ajout artificiel de poussières désertiques dans des mésocosmes en Méditerranée (projet DUNE)



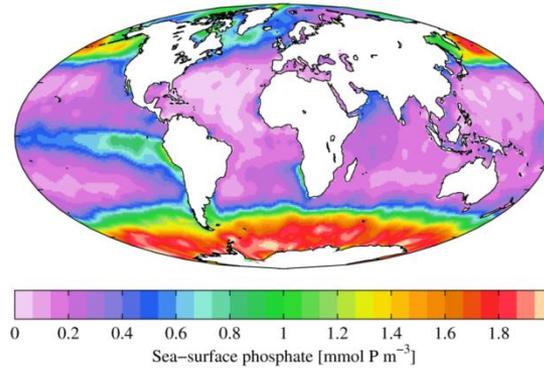
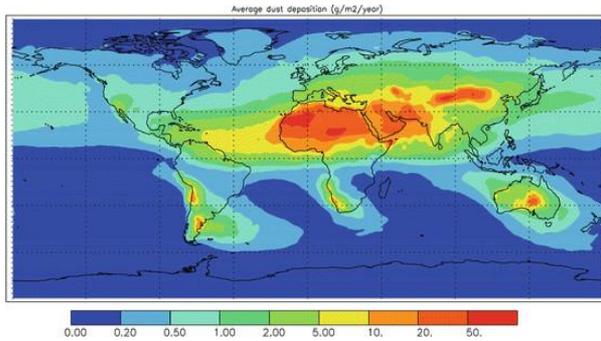
La production nette communautaire est directement proportionnelle à l'apport atmosphérique de Fe dans l'océan Austral



Ridame et al. 2014

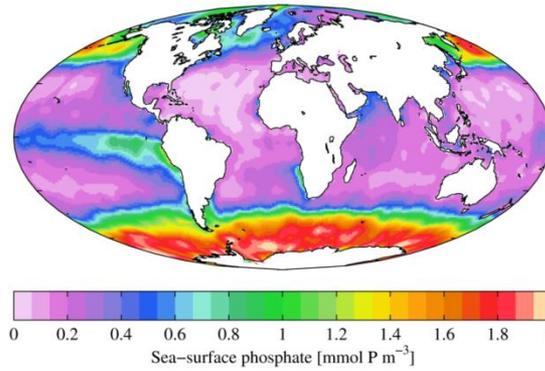
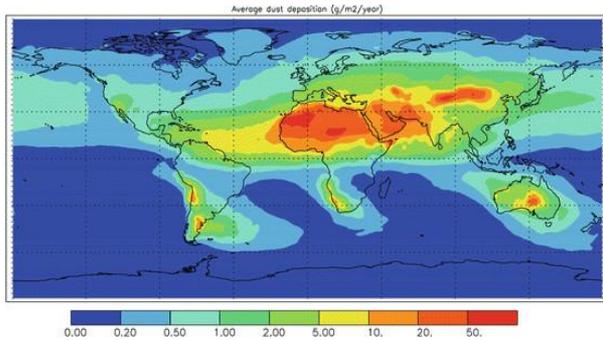
Cassar et al. 2007

# Expériences grande échelle de fertilisation en fer



Les régions océaniques où l'activité phytoplanctonique est limitée par la disponibilité en Fe → **absence de poussières**

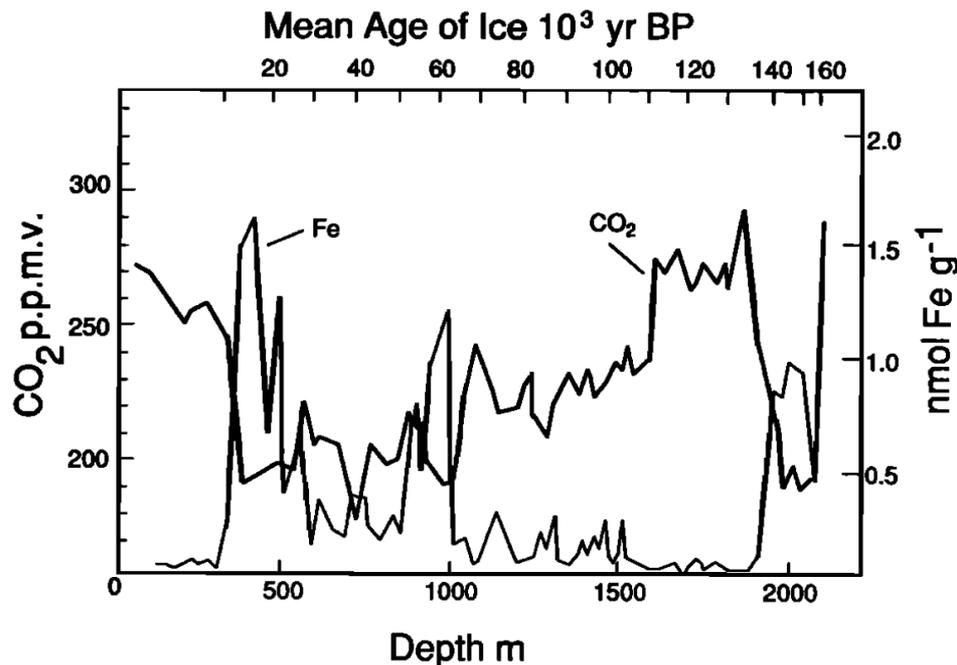
# Expériences grande échelle de fertilisation en fer



Les régions océaniques où l'activité phytoplanctonique est limitée par la disponibilité en Fe → **absence de poussières**

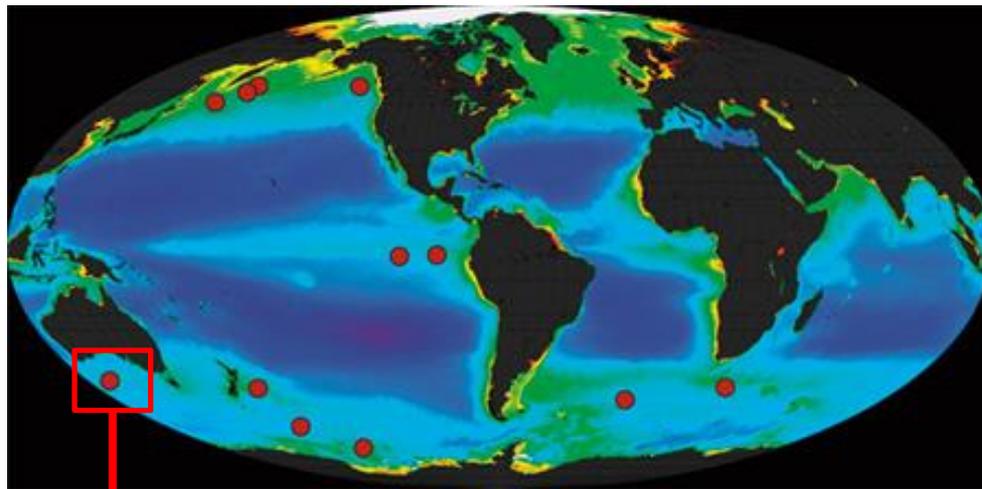
## L'hypothèse du fer de John Martin

« *Give me a half tank of iron and I will give you the next ice age* »

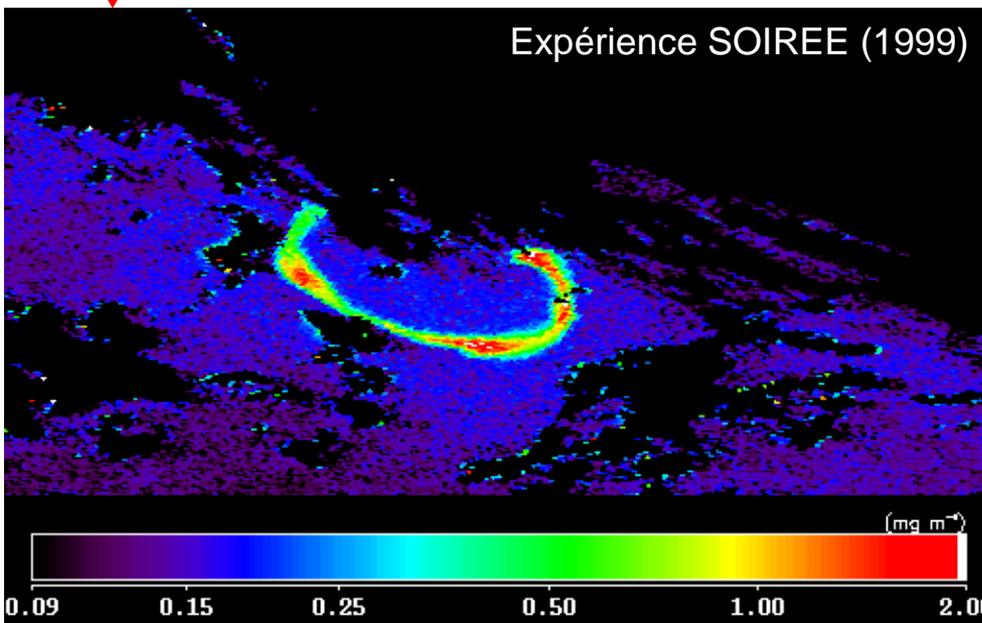


Analyse de carottes glaciales: les périodes glaciales se caractérisent par une diminution de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique liée (ou pas?) à une augmentation de la concentration en fer provenant des poussières désertiques

# Expériences grande échelle de fertilisation en fer



Expérience SOIREE (1999)



Ce que ces expériences nous ont appris:

- ❑ La disponibilité en Fe limite en effet l'activité du phytoplancton dans 1/3 de la surface de l'océan
- ❑ L'ajout de Fe induit un changement de la communauté (phyto plus grand)
- ❑ L'ajout de Fe peut induire une diminution du  $\text{CO}_2$  dissous de jusqu'à 40%
- ❑ La plupart du  $\text{CO}_2$  fixé est reminéralisée avant d'arriver au fond des océans
- ❑ Les effets collatéraux sont difficiles voire impossibles à prévoir

# Fertiliser l'océan avec du Fe pour mitiger le changement climatique



Depuis le début des années 2000, des études suggèrent que la pompe océanique de carbone pourrait être stimulée à travers l'ajout artificiel de nutriments simulant l'apport éolien

# Fertiliser l'océan avec du Fe pour mitiger le changement climatique



Depuis le début des années 2000, des études suggèrent que la pompe océanique de carbone pourrait être stimulée à travers l'ajout artificiel de nutriments simulant l'apport éolien

Aujourd'hui, l'efficacité de ce type d'approche a été revue à la baisse

$$C_{\text{fixé}}/Fe_{\text{ajouté}} = 100000$$

(qq \$/tonne  $C_{\text{fixé}}$ )

$$C_{\text{fixé}}/Fe_{\text{ajouté}} = 2000$$

(>300 \$/tonne  $C_{\text{fixé}}$ )

Une fertilisation à l'échelle globale pendant 100 ans  $\rightarrow$  <9%  $CO_2$

# Fertiliser l'océan avec du Fe pour mitiger le changement climatique



Depuis le début des années 2000, des études suggèrent que la pompe océanique de carbone pourrait être stimulée à travers l'ajout artificiel de nutriments simulant l'apport éolien

Aujourd'hui, l'efficacité de ce type d'approche a été revue à la baisse

D'autres critères à considérer:

- La vérification est difficile
- Effets collatéraux:
  - Espèces toxiques
  - ↓ O<sub>2</sub>
  - Production gaz



Principe de précaution

$$C_{\text{fixé}}/Fe_{\text{ajouté}} = 100000$$

(qq \$/tonne  $C_{\text{fixé}}$ )

$$C_{\text{fixé}}/Fe_{\text{ajouté}} = 2000$$

(>300 \$/tonne  $C_{\text{fixé}}$ )

Une fertilisation à l'échelle globale pendant 100 ans → <9% CO<sub>2</sub>

1 August 2013

Suomi NPP / VIIRS

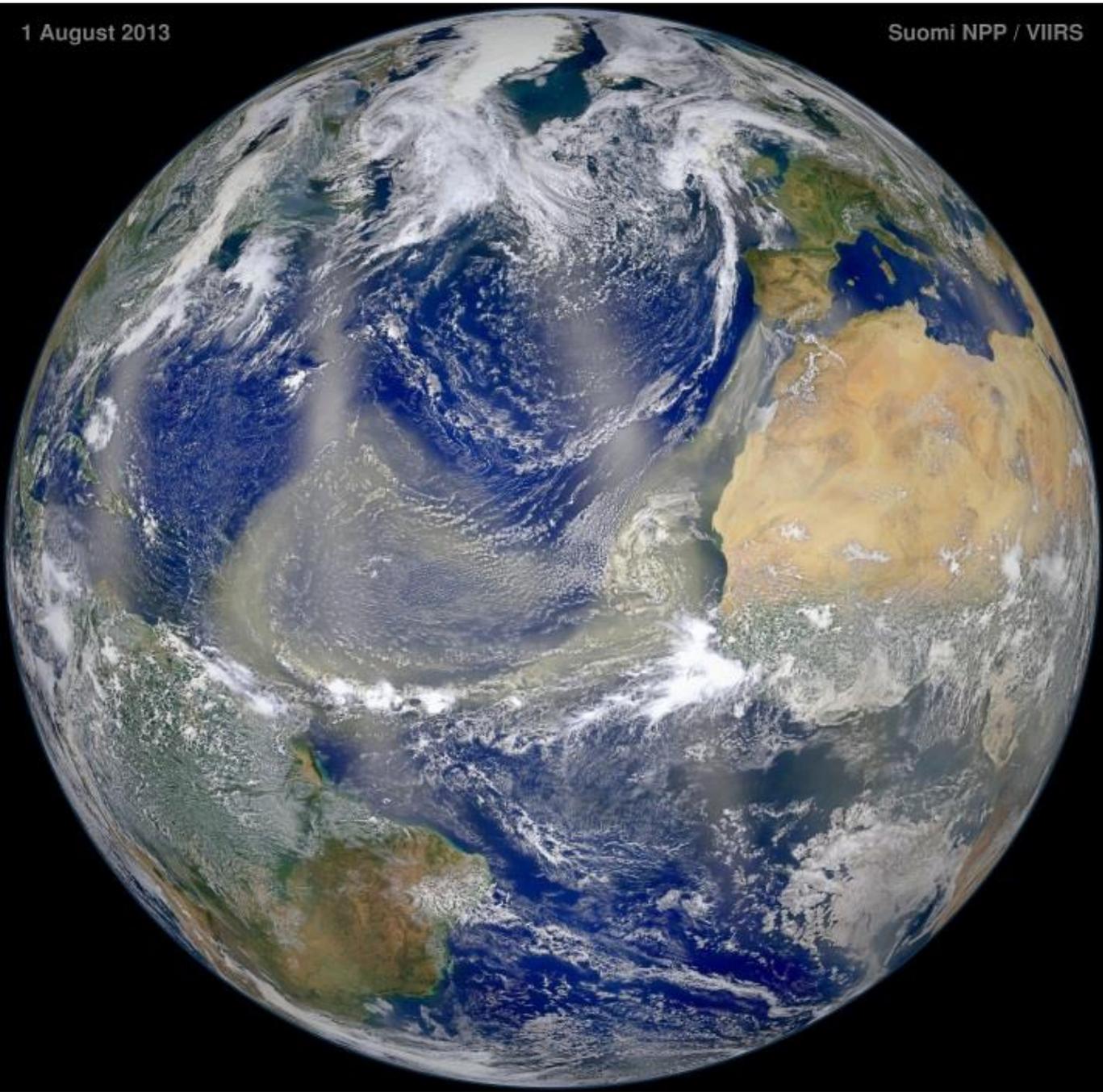
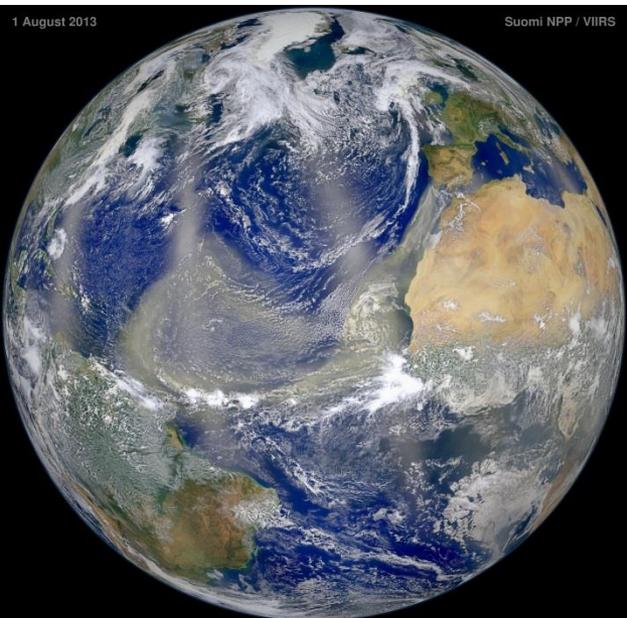


Image Earth Observatory, NASA



Merci de votre attention