

La Terre et l'environnement observés depuis l'espace

Leçon n 3

« L'océan sous l'œil des satellites »

Anny Cazenave
Collège de France

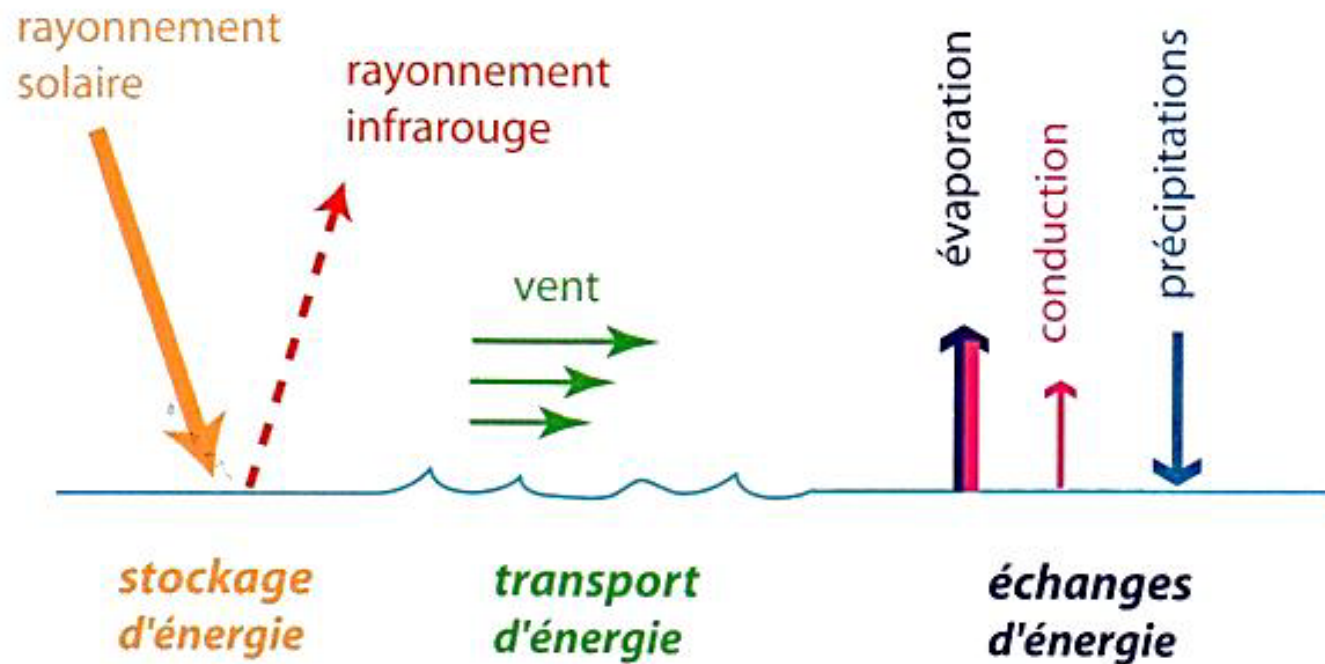
L'océan: 71% de la surface terrestre

97% de la masse totale d'eau sur terre

Profondeur moyenne : 3800 m

Masse de l'océan = 300 fois celle de l'atmosphère

Chaleur spécifique de l'eau = 4 fois celle de l'air





La circulation océanique

L'océan et le climat

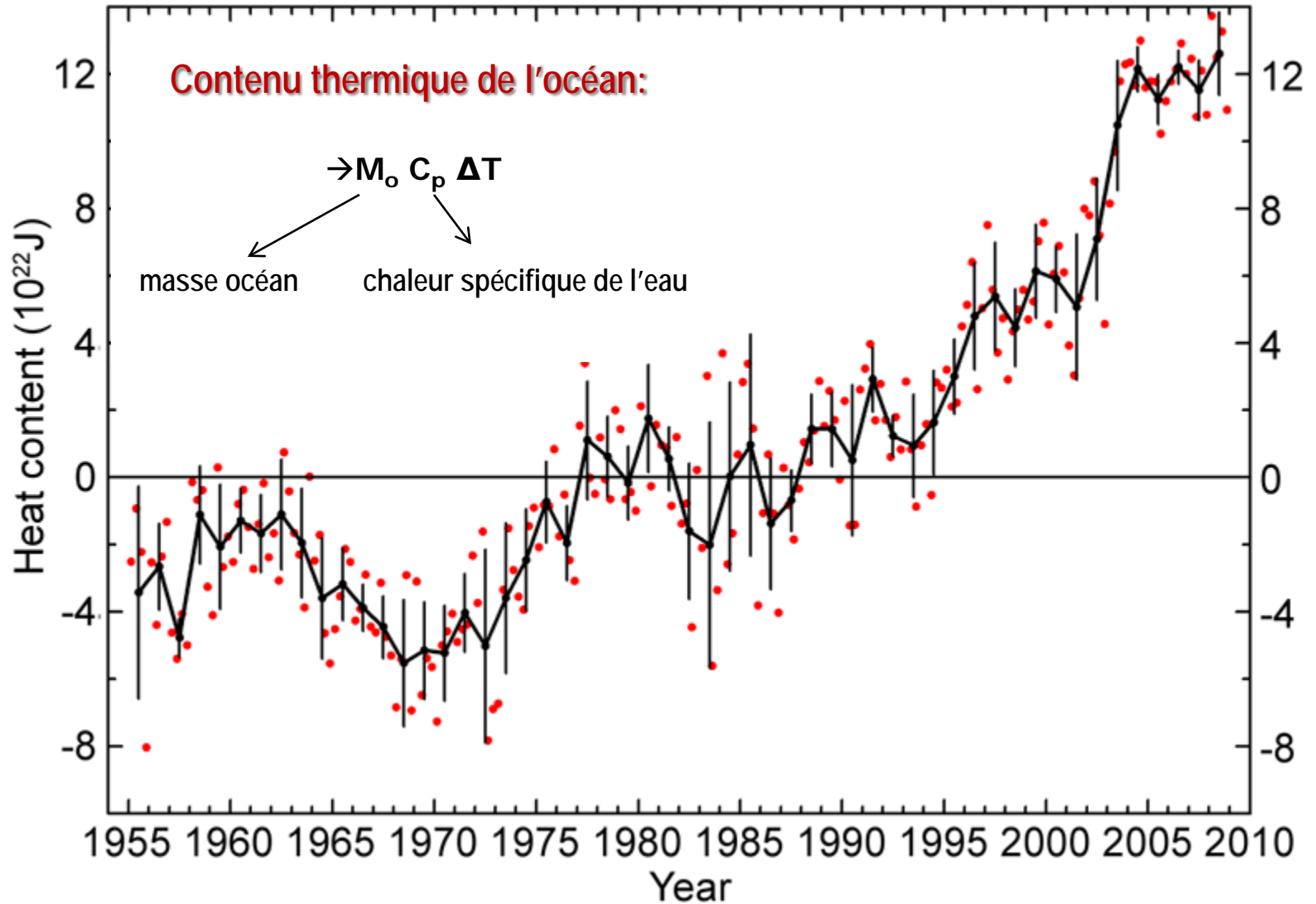
- *Principal réservoir de chaleur du système climatique (grande inertie thermique)*
- *Transporte et redistribue la chaleur sur des échelles de temps beaucoup plus longues que l'atmosphère*
- *Mémoire à long terme du système climatique*

Circulation complexe

- *Vents de surface*
- *Contrastes de température et de salinité*
- *Rotation Terre*

Emissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines → océan = « puits » de dioxyde de carbone

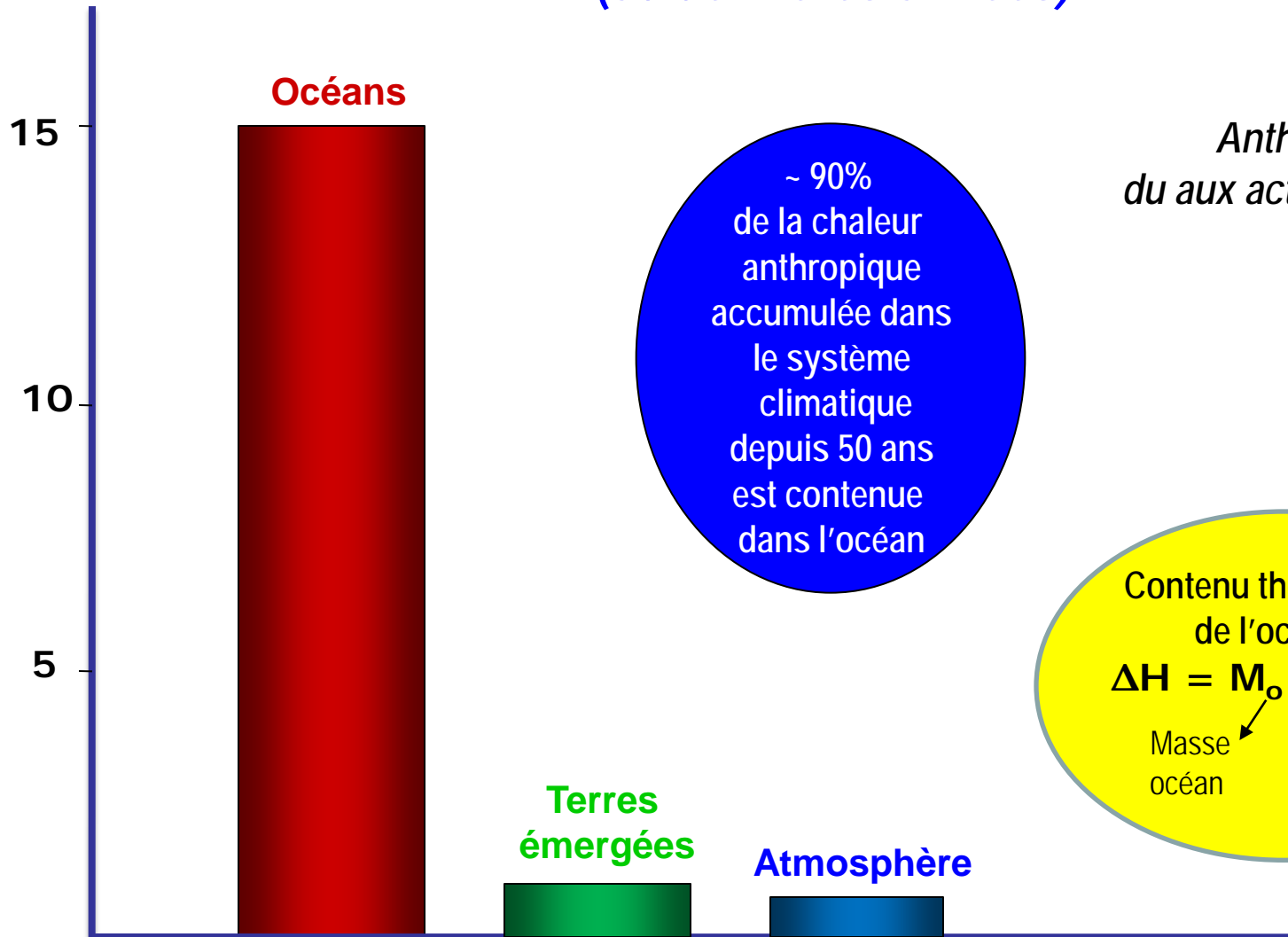
Réchauffement de l'océan = augmentation du contenu thermique



Bilan thermique du système climatique

(50 dernières années)

Contenu thermique (10^{22} J)



*Anthropique =
du aux activités humaines*

~ 90%
de la chaleur
anthropique
accumulée dans
le système
climatique
depuis 50 ans
est contenue
dans l'océan

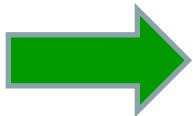
Contenu thermique
de l'océan
 $\Delta H = M_o C_o \Delta T$
Masse océan Chaleur
spécifique
eau

Les grands modes de variabilité interne du système couplé océan-atmosphère

*El Nino/La Nina (ENSO –El Nino-Southern Oscillation-),
Oscillation Pacifique Décennale, Oscillation Nord Atlantique,*

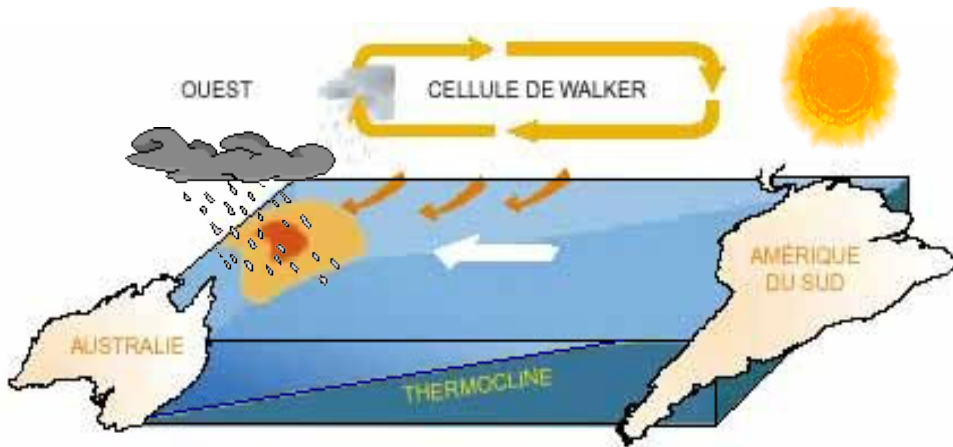
Résultent de la variabilité naturelle interne du système climatique

(rétroactions dans et entre les différentes composantes du système climatique)
*Cette variabilité s'explique par la nature chaotique du système climatique
(en particulier l'atmosphère) et par la présence de processus non-linéaires
(phénomènes à seuil, etc.) dans chaque sous-système (avec des constantes de temps propres
à chaque sous-système) et par les interactions (couplages) entre les sous-systèmes.
Cette variabilité s'exprime sur une vaste gamme de fréquences spatiales et temporelles.
Le forçage externe naturel (solaire, volcanisme) se superpose à cette variabilité interne et
et interagit avec elle.*

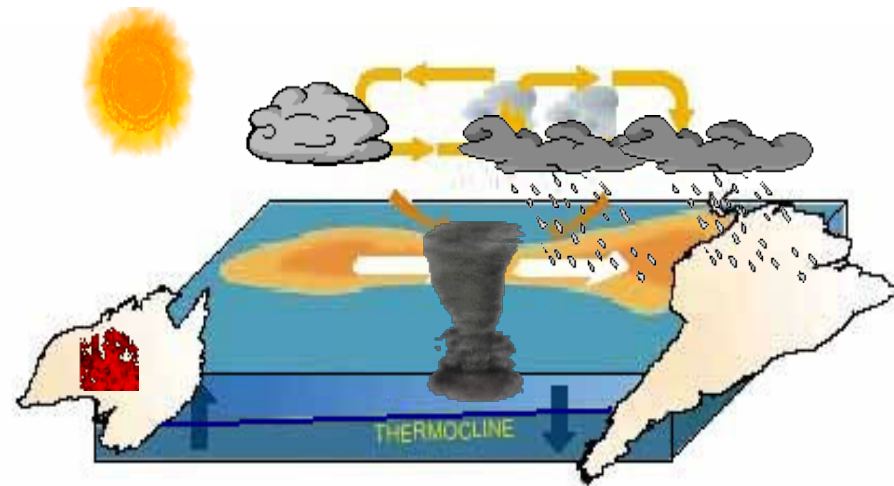


**Forte empreinte sur la variabilité climatique mondiale
aux échelles de temps de quelques années à quelques décennies**

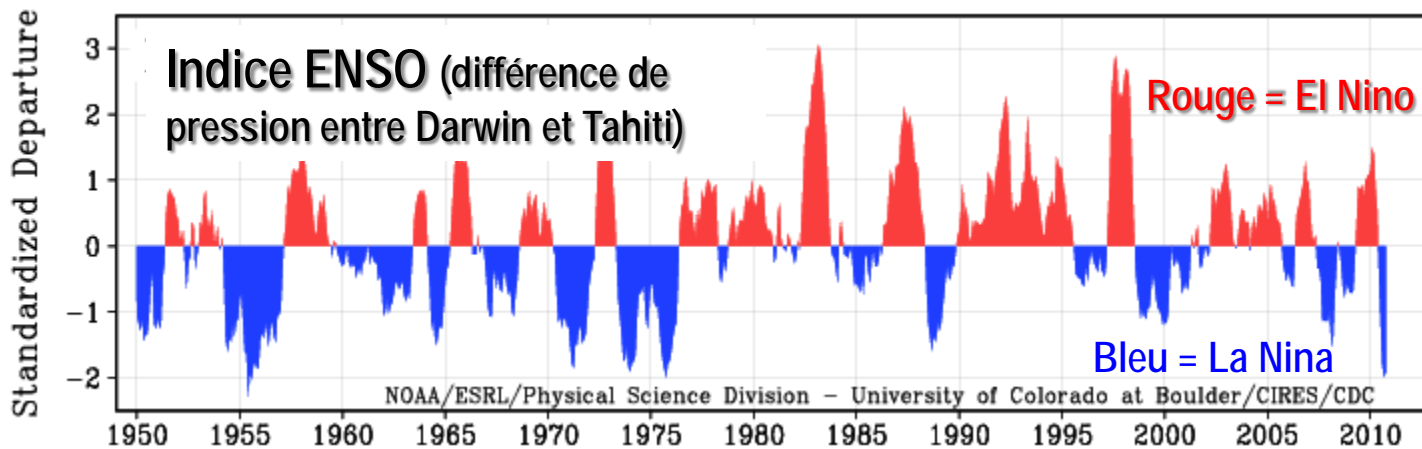
El Nino-Southern Oscillation (ENSO)



Conditions normales

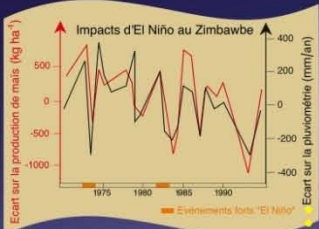


El Nino



« El-Nino »

Heurs et malheurs du phénomène El Niño



Un temps exceptionnellement chaud en Afrique australe a provoqué une baisse de moitié de la récolte de maïs au Zimbabwe, soit une perte de 130 millions de dollars. L'épisode El Niño a affecté les récoltes de cacao de Côte d'Ivoire (15% en moins). Mais, dès fin août 1997, le marché boursier anticipait le phénomène et le prix de la fève atteignait 1 900 dollars la tonne, son plus haut cours depuis 1988.

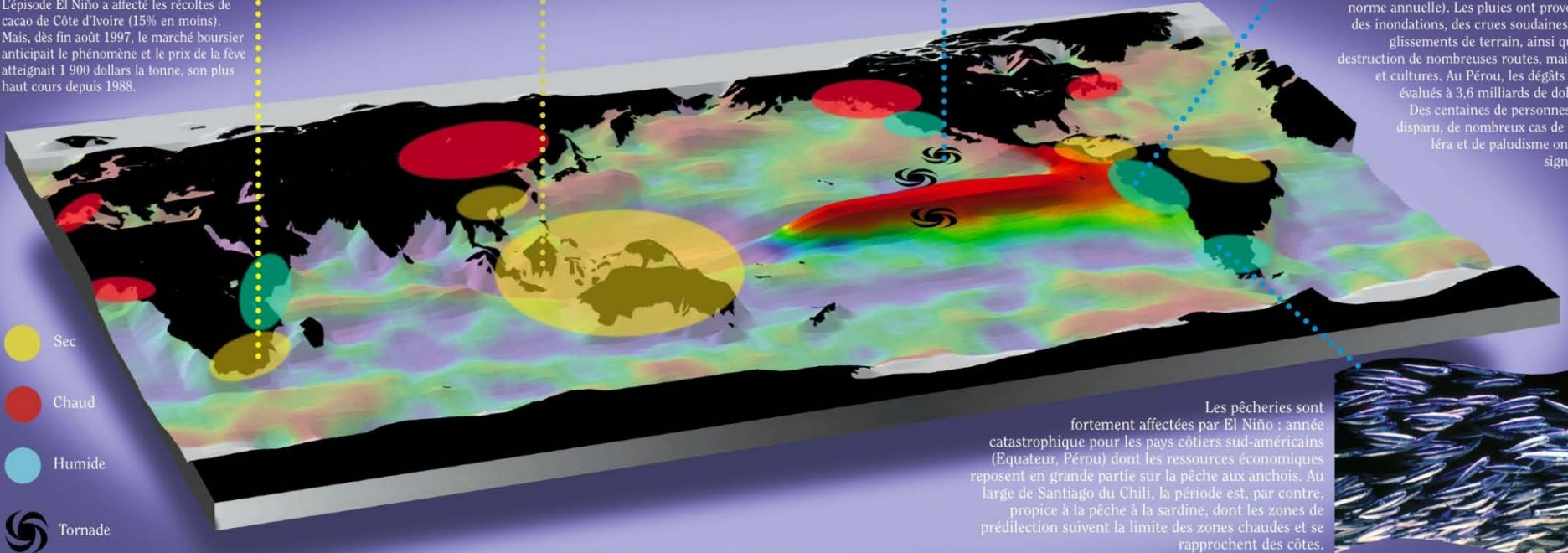
La sécheresse affecte l'Indonésie et la Papouasie-Nouvelle Guinée ; de nombreux incendies ont détruit plus de 2 millions d'hectares de forêt. Les dommages ont été évalués à 4,4 milliards de dollars, avec de nombreuses victimes du fait des maladies et de la malnutrition.



La zone des précipitations et des cyclones se déplace vers le centre du Pacifique. L'activité cyclonique est réduite sur les Caraïbes et un hiver plutôt doux s'installe sur une partie du continent nord-américain et sur le Japon.



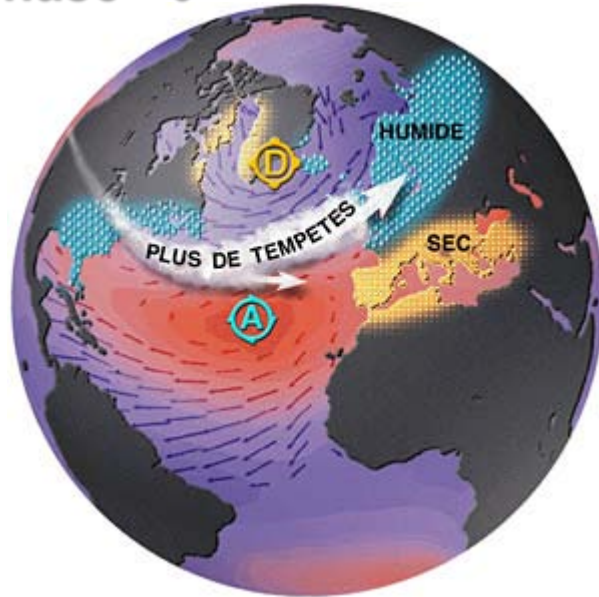
Les côtes de l'Équateur et du nord du Pérou ont subi une période très pluvieuse, recevant entre 350 et 775 mm de pluie en décembre 1997 et janvier 1998 (15 fois plus que la norme annuelle). Les pluies ont provoqué des inondations, des crues soudaines, des glissements de terrain, ainsi que la destruction de nombreuses routes, maisons et cultures. Au Pérou, les dégâts sont évalués à 3,6 milliards de dollars. Des centaines de personnes ont disparu, de nombreux cas de choléra et de paludisme ont été signalés.



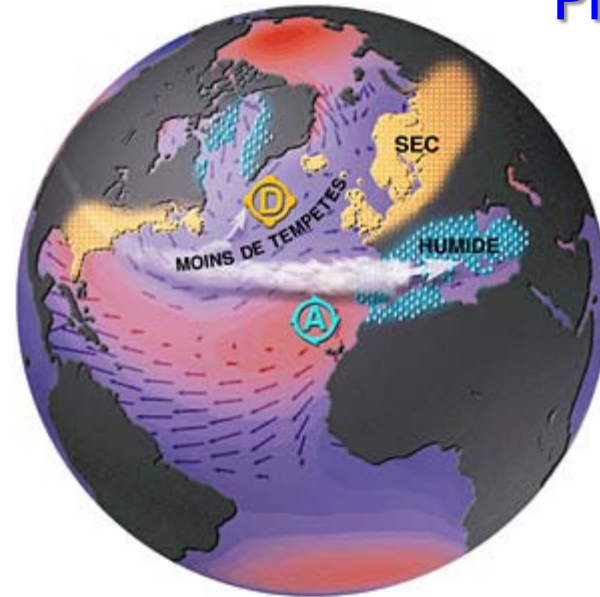
L'Oscillation Nord Atlantique

(Fluctuation simultanée de la dépression d'Islande et de l'anticyclone des Açores)

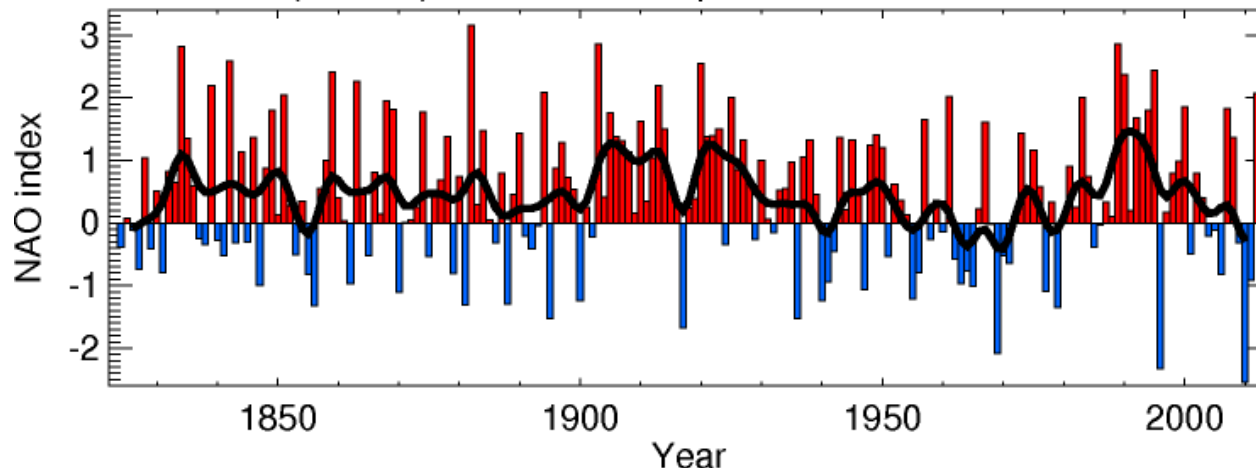
Phase >0



Phase <0



Winter (DJFM) NAO index updated to winter 2011/2012



Différence de pression entre les Açores et l'Islande

Et aussi:

L'Oscillation Pacifique Décennale (**PDO** = Pacific Decadal Oscillation)

Oscillation Atlantique Multidécennale (**AMO** = Atlantic Multidecadal Oscillation)

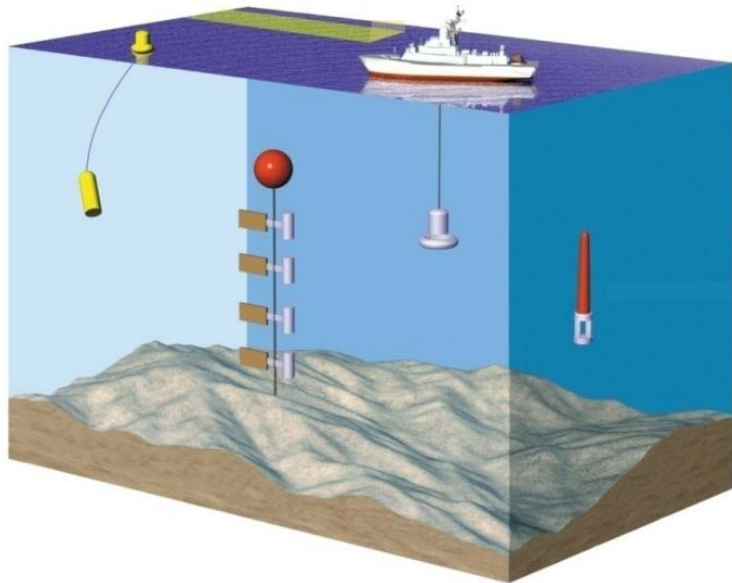
Oscillation Arctique (**AO** = Arctic Oscillation)

Dipôle de l'Océan Indien (**IOD** = Indian Ocean Dipole)

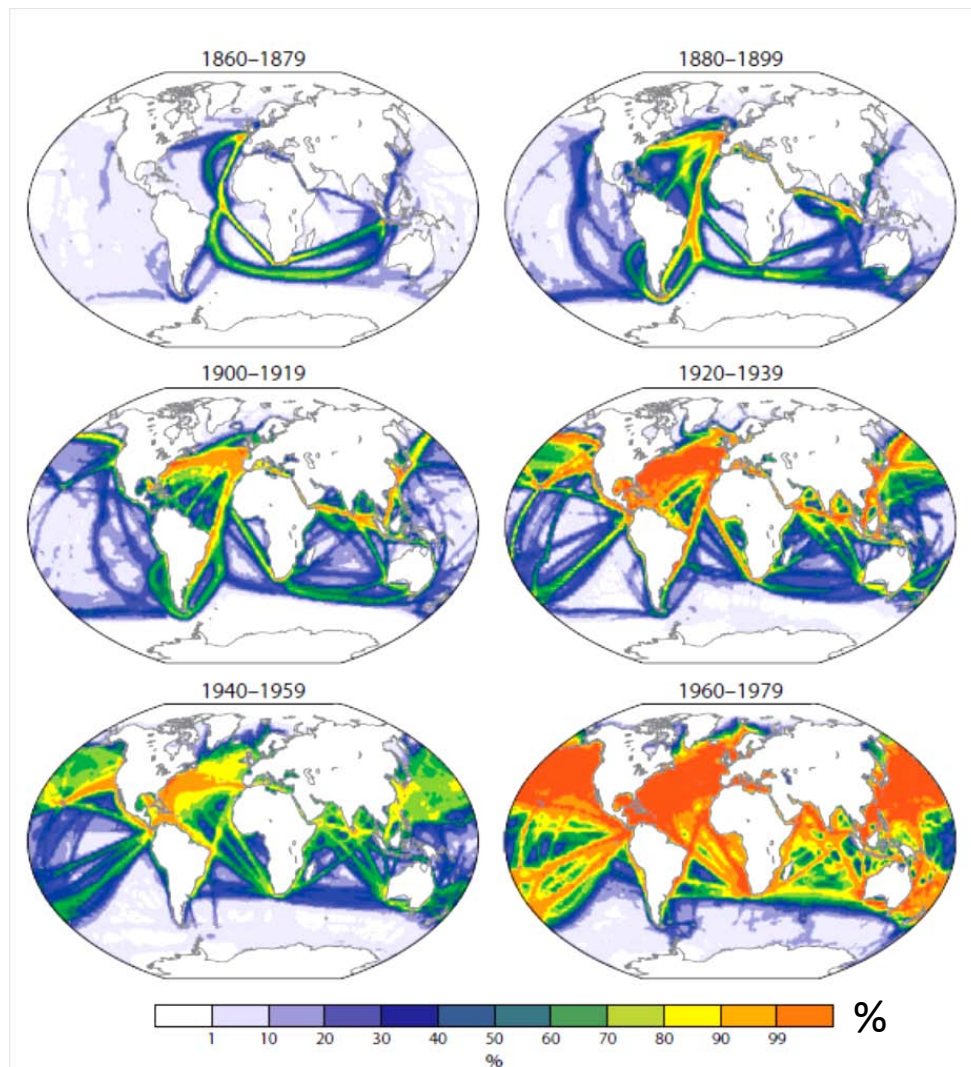
.....

Mesures in situ des propriétés de l'océan (température, salinité, courants, etc.)

Depuis 1950 environ: principalement le long des routes commerciales



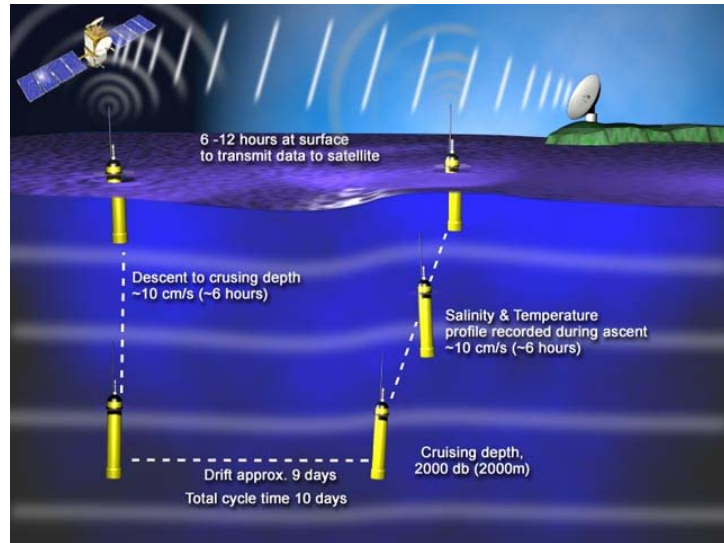
Couverture des mesures in situ de la température de surface de la mer sur les périodes successives de 20 ans



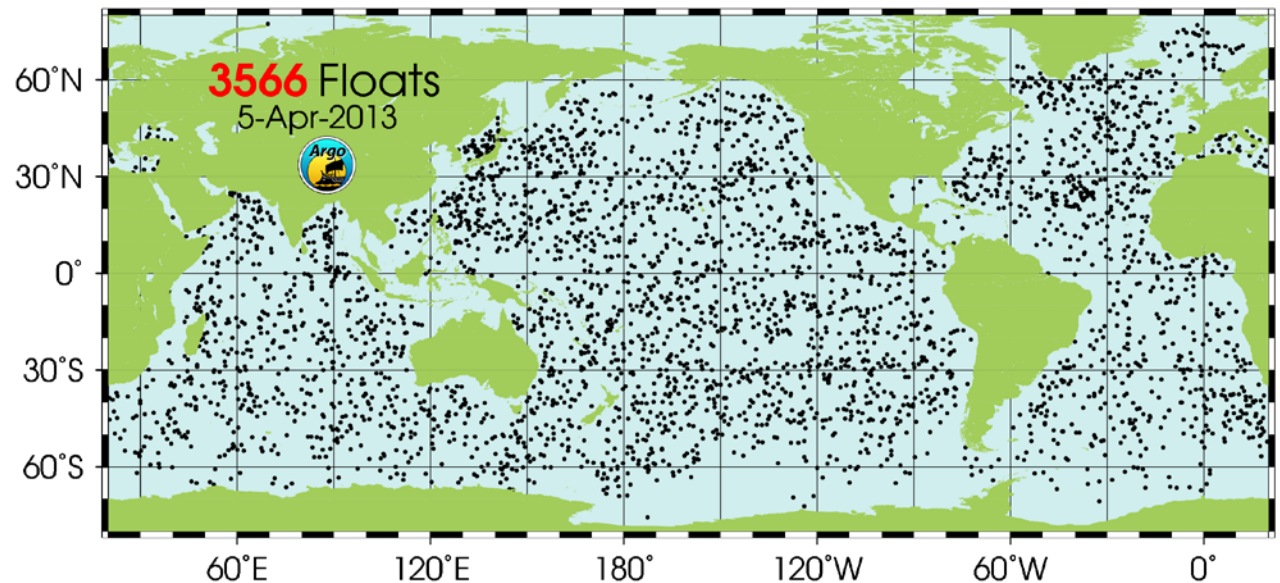
Pourcentage de mois avec au moins 1 mesure dans une zone de 2°x2°

Depuis 10 ans: Programme international Argo

→ mesures de la température et de la salinité de l'océan jusqu'à 2000 m de profondeur



Flotteurs 'Argo'



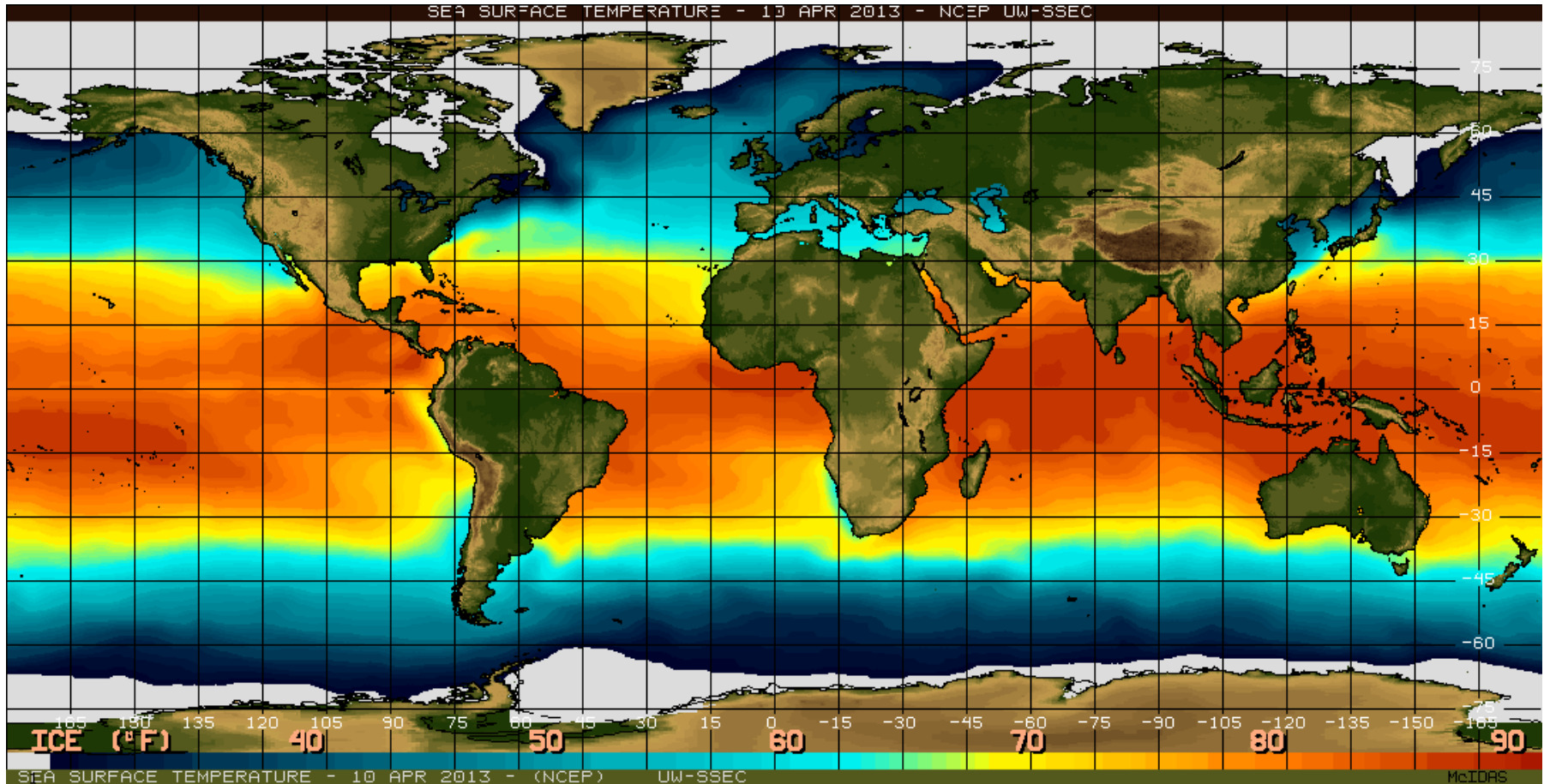
L'observation de l'océan depuis l'espace



Principaux paramètres océaniques mesurés depuis l'espace:

- Température de surface de la mer: Radiomètres embarqués (micro-ondes passives)
- Salinité de surface: Radiométrie/interférométrie
- Topographie de surface de l'océan (courants; marées, niveau de la mer): Altimétrie spatiale
- Vents de surface: micro-ondes actives (altimétrie radar/diffusiomètres)
- Hauteur des vagues: Altimétrie; Imagerie Radar
- Couleur de l'eau (phytoplancton → écosystèmes marins): Imagerie multispectrale
- Masse de l'océan/Pression de fond: Altimétrie; Gravimétrie spatiale

Température de surface de la mer le 10 avril 2013



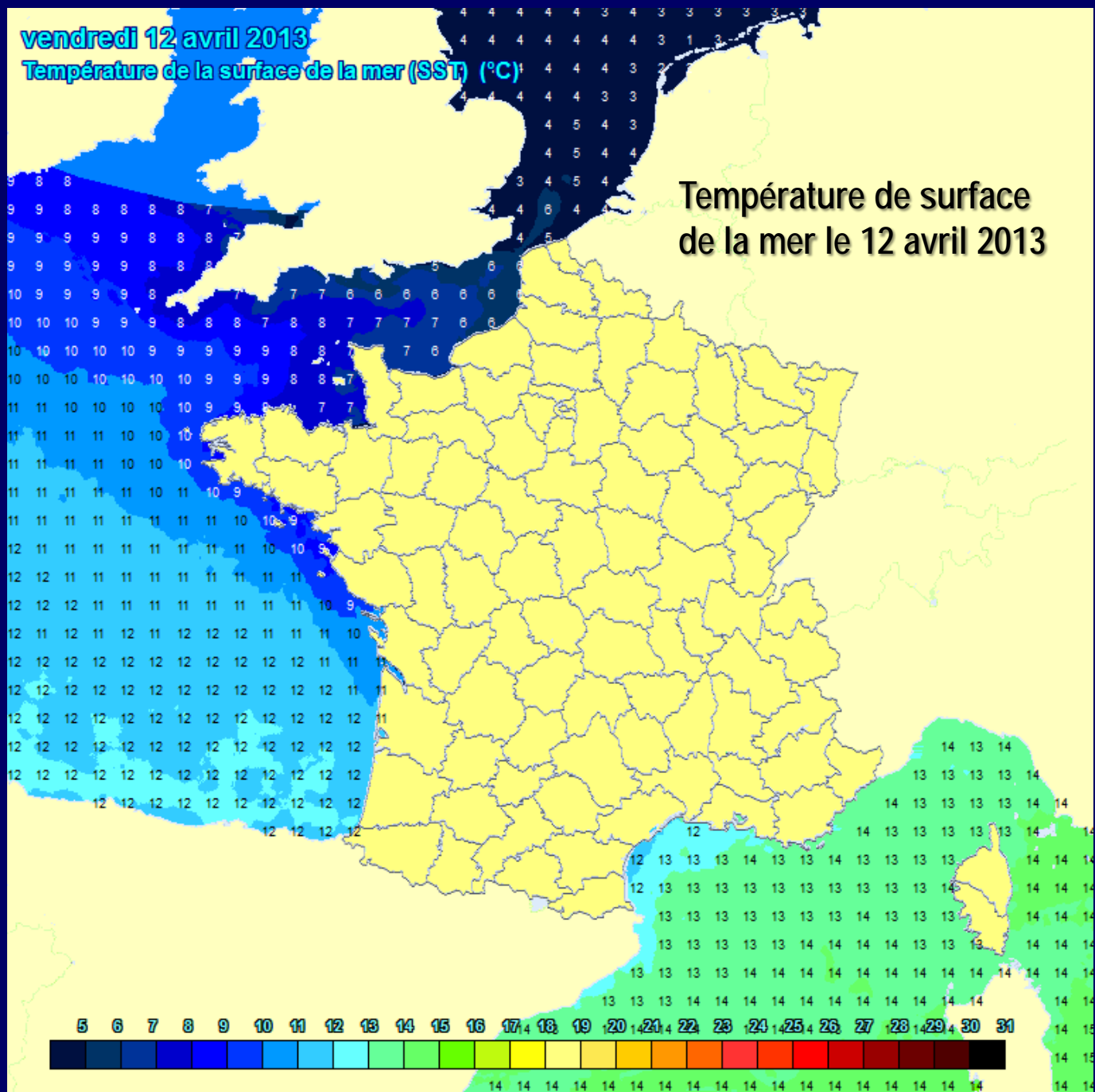
Degrés Fahrenheit

Source: NOAA

vendredi 12 avril 2013

Température de la surface de la mer (SST) (°C)

Température de surface
de la mer le 12 avril 2013

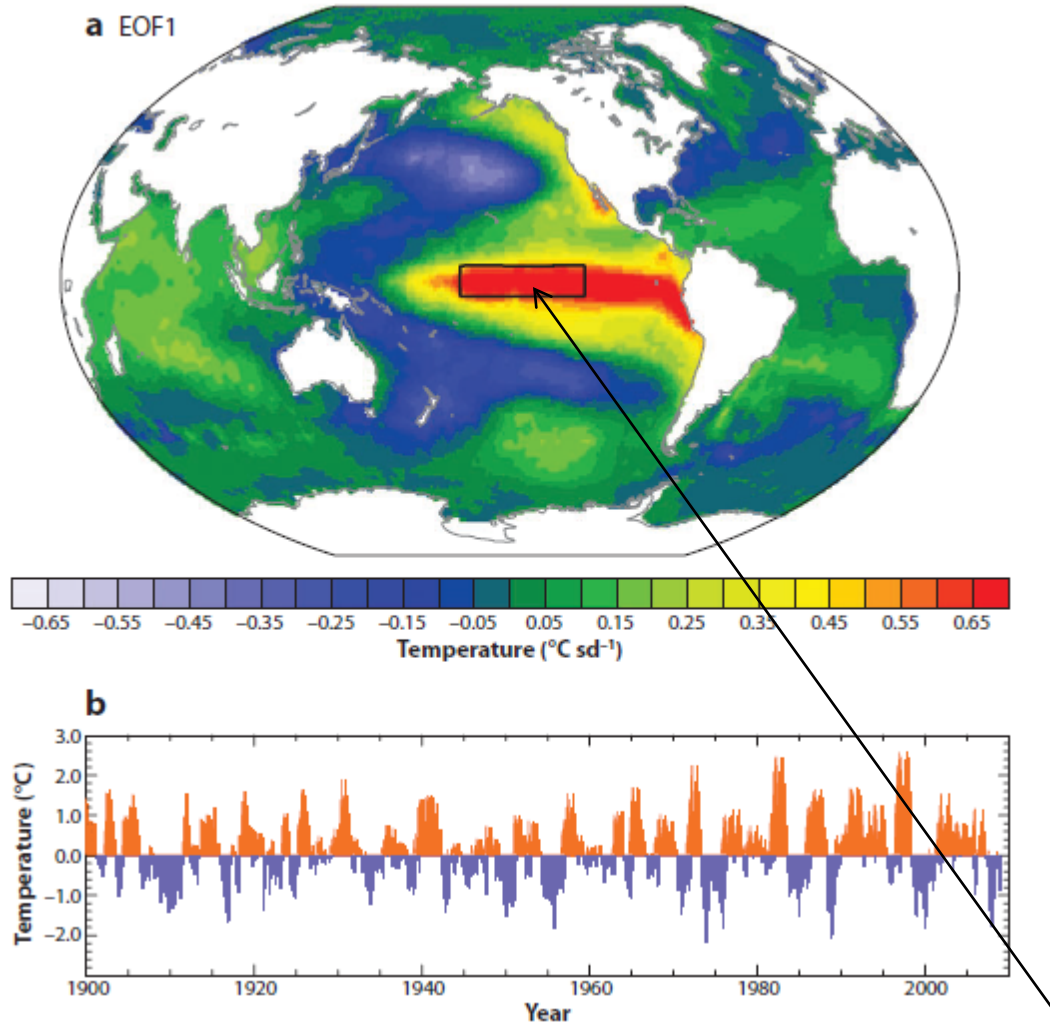


Pourquoi est-il important de connaître la température de surface de la mer?

- **Les premiers mètres de l'océan contiennent autant de chaleur que toute l'atmosphère**
- **Les échanges de masse et d'énergie à l'interface air-mer dépendent principalement d'une quantité 'océanique': la température de surface de la mer (SST 'Sea Surface Temperature') (ils dépendent aussi du vent de surface, de la température de l'air, de l'humidité et des nuages)**
- **La SST joue un rôle clé dans la régulation du climat et sa variabilité**
- **La connaissance de la SST est fondamentale pour les prévisions saisonnières et interannuelles du climat**

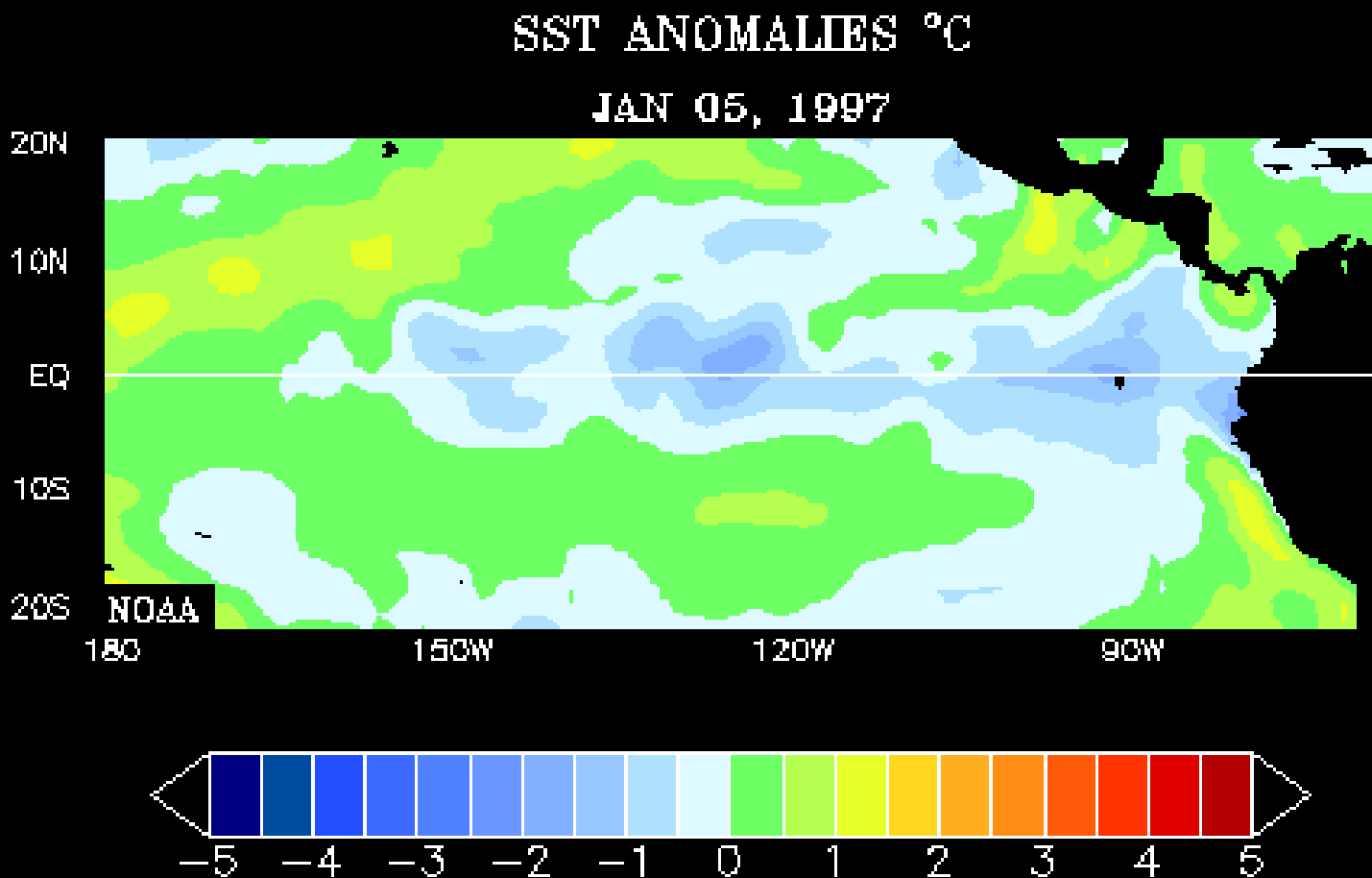
SST= Sea Surface Temperature

Mode dominant des variations de la température de surface de la mer dans le Pacifique tropical → ENSO (El Nino Southern Oscillation)

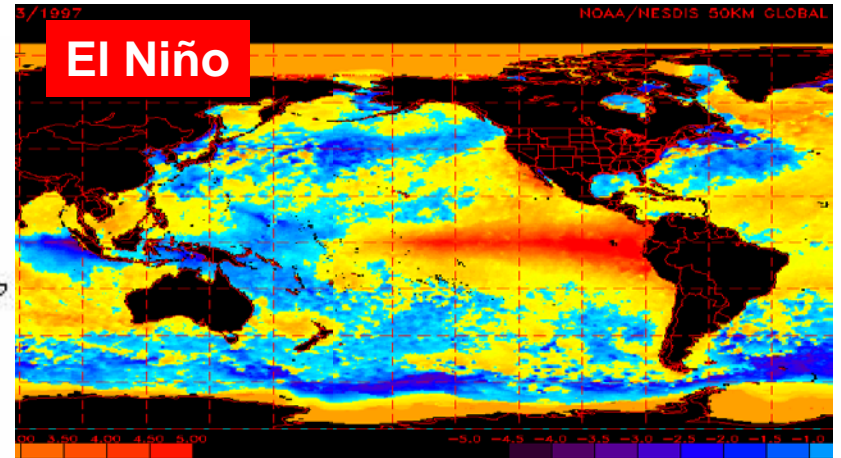
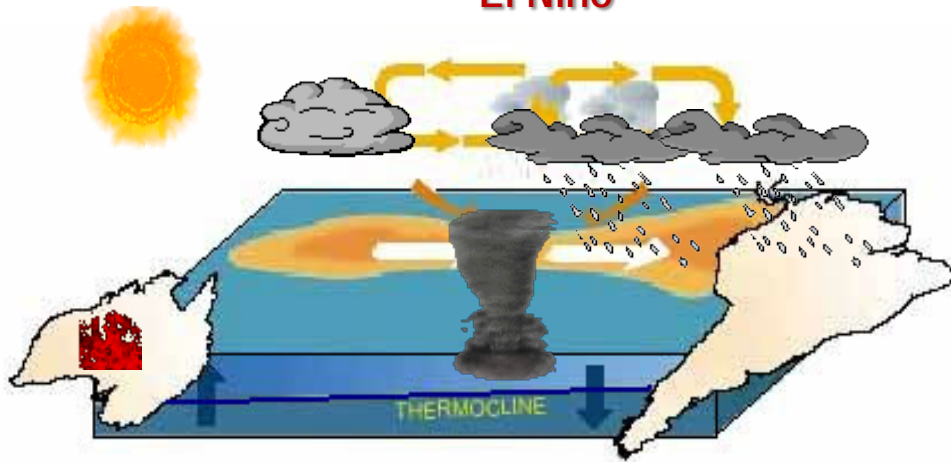


Oscillations de température de surface de la mer dans la zone

Anomalies de température de surface de la mer durant l'évènement ENSO de 1997-1998

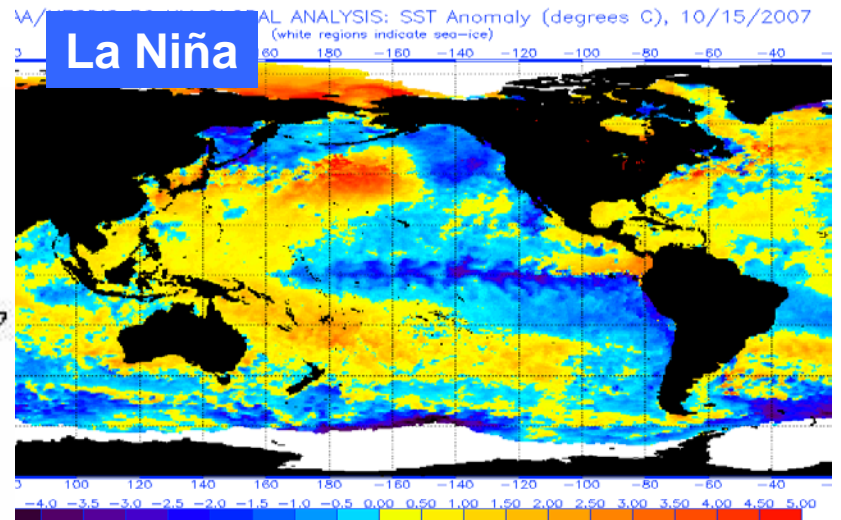
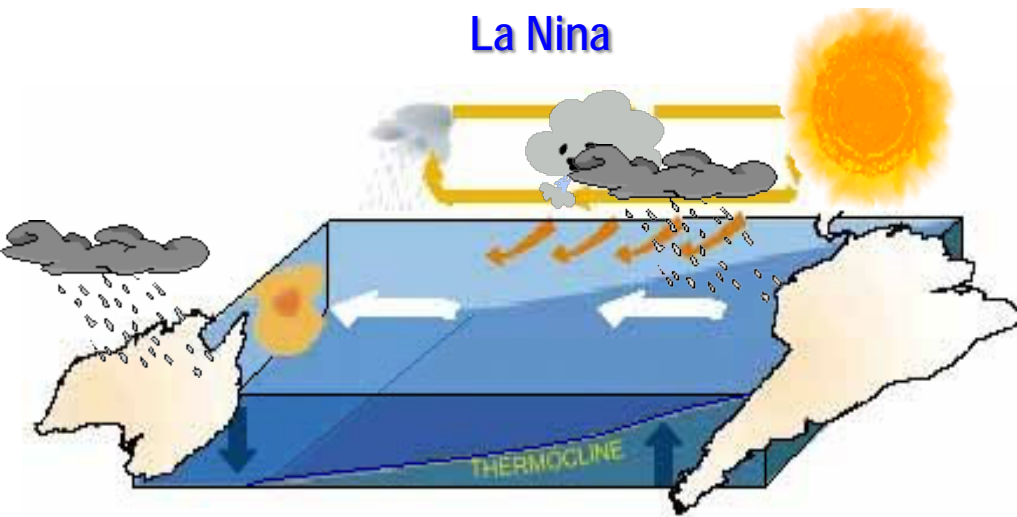


El Nino



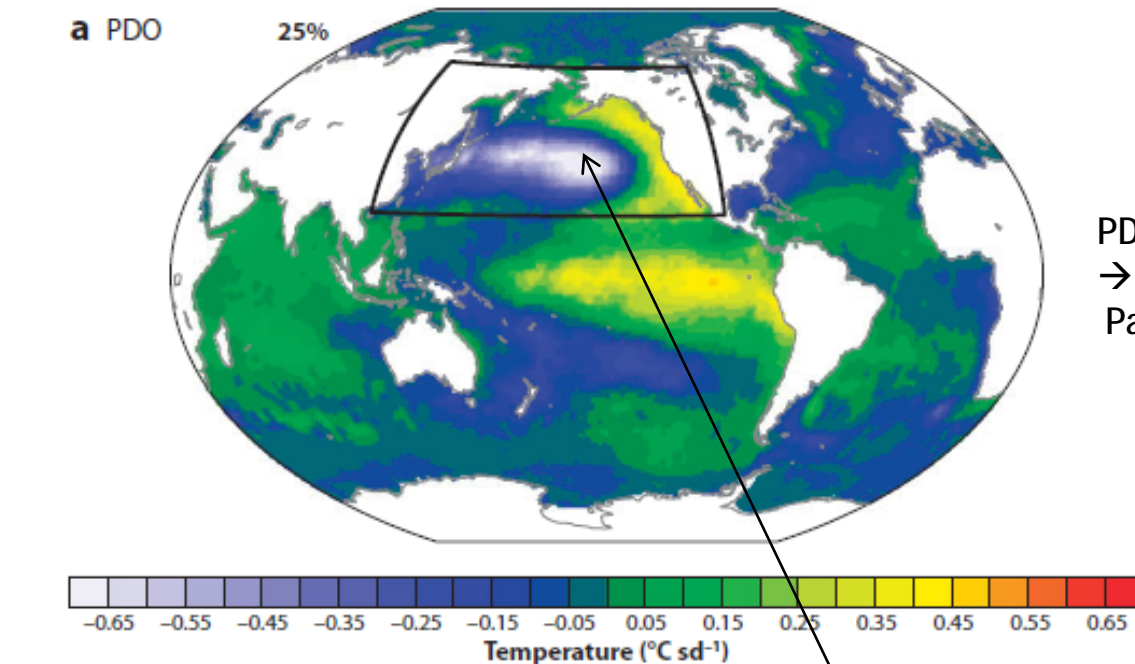
Anomalies de température du 13 Nov. 1997

La Nina

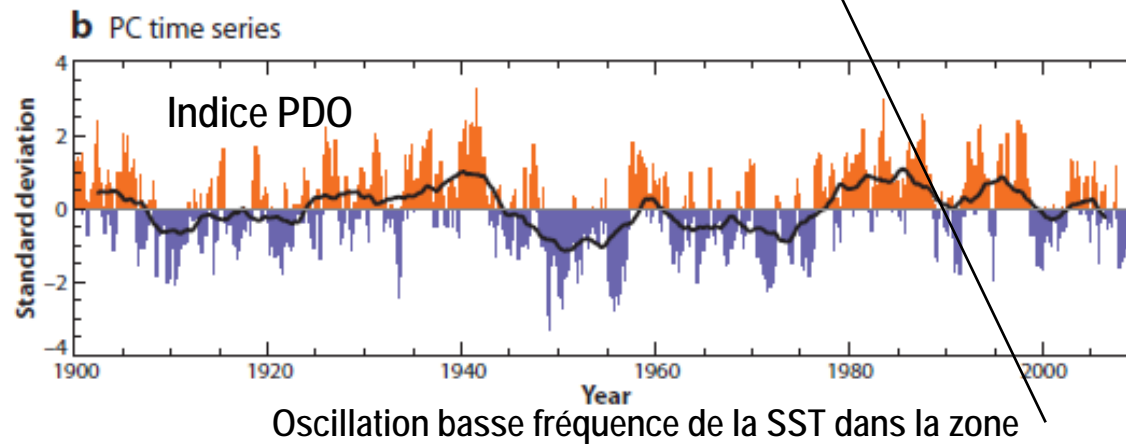


Anomalies de température du 15 Oct. 2007

Le second mode dominant de la température de surface de la mer dans le Pacifique: L'Oscillation Pacifique Décennale (Pacific Decadal Oscillation- PDO)

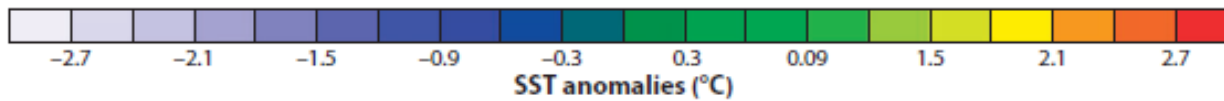
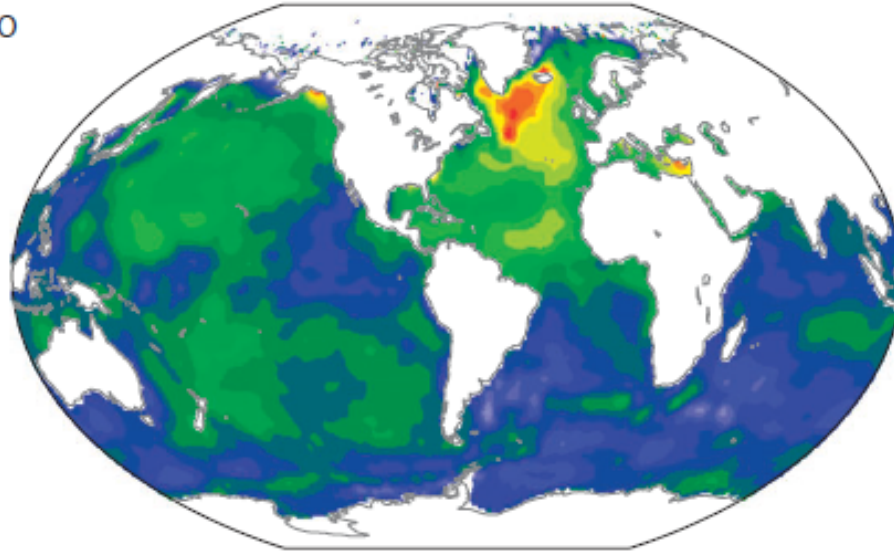


PDO >0
→ Pacifique tropical + chaud,
Pacifique nord ouest + froid

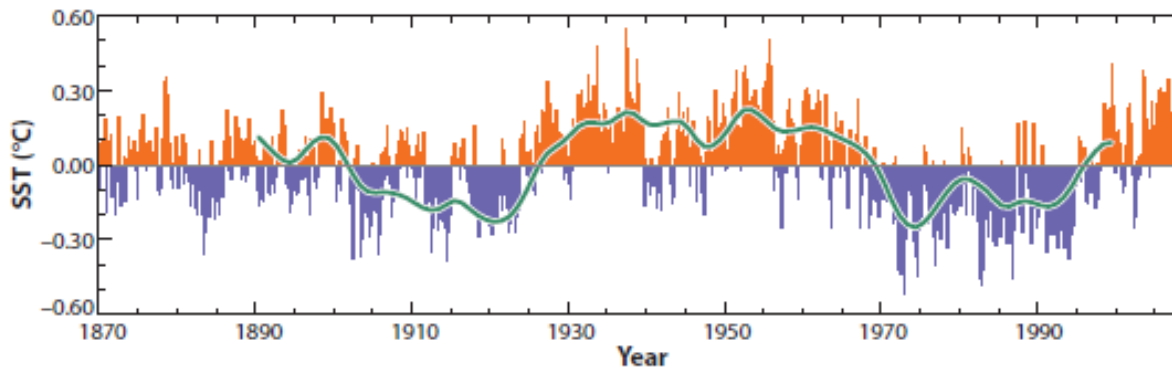


Mode dominant de variation de la SST dans l'Atlantique nord: « Atlantic Multidecadal Oscillation »

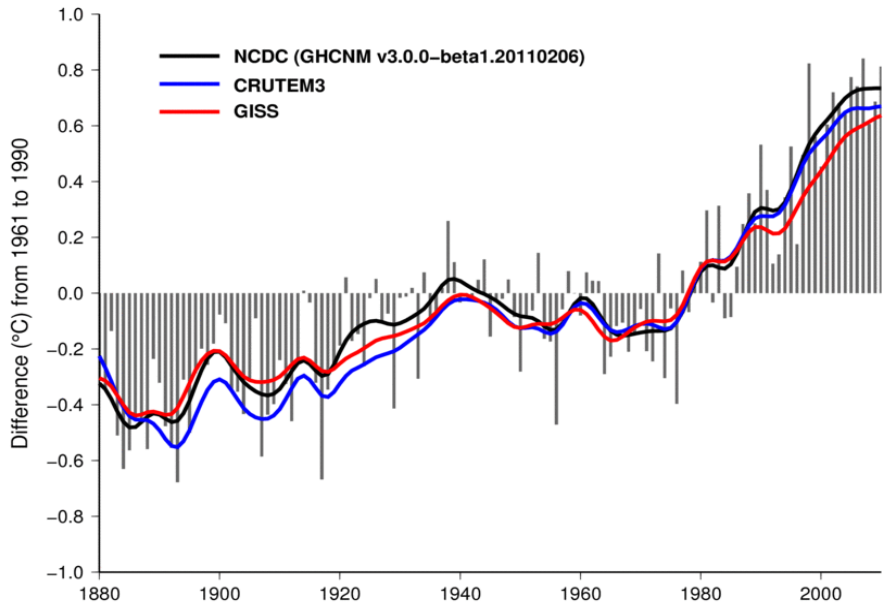
a AMO



b North Atlantic SST index

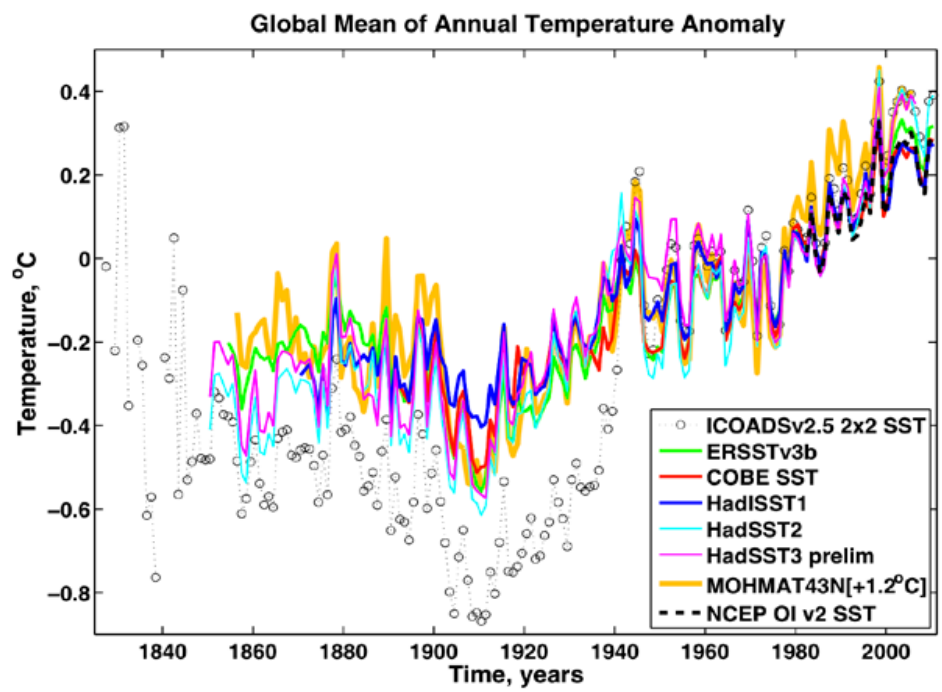
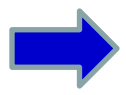


Oscillation basse fréquence de la SST dans l'Atlantique nord (période 60-80 ans)

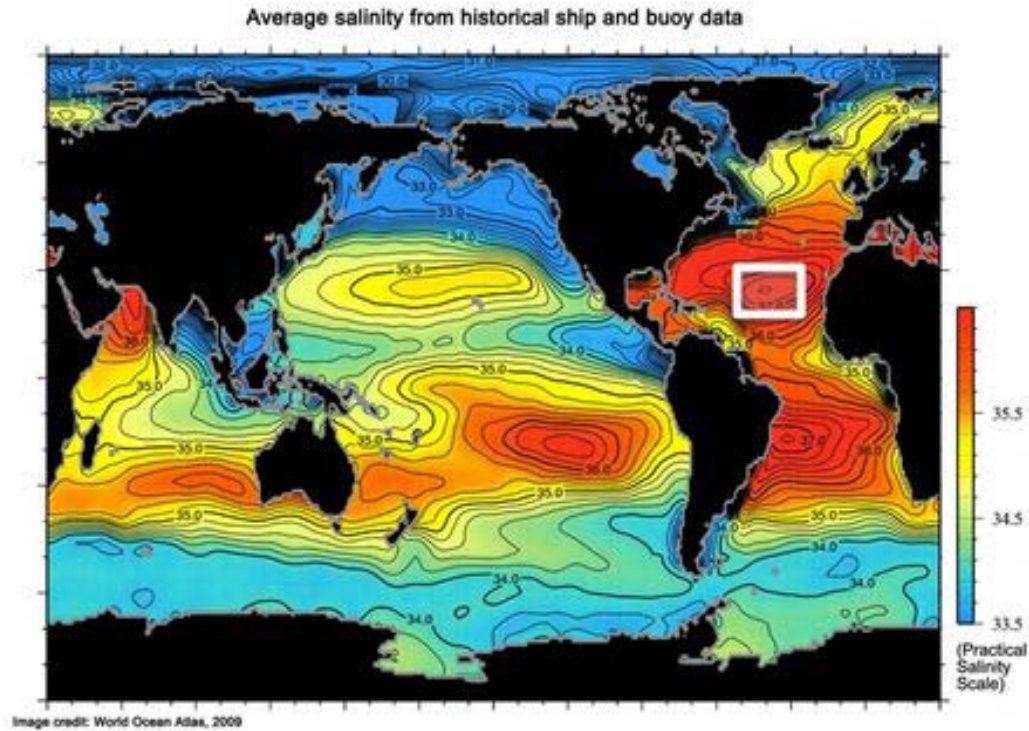


Evolution de la température moyenne de l'air en surface au 20^{ème} siècle

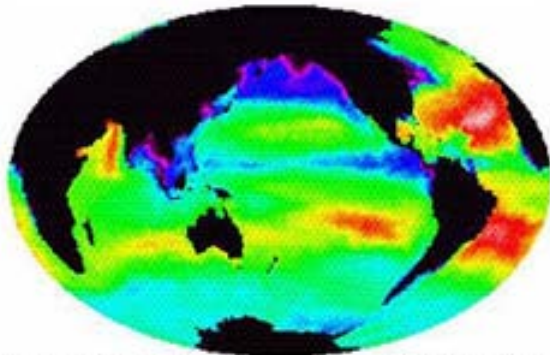
Evolution de la température moyenne de la surface de l'océan au 20^{ème} siècle



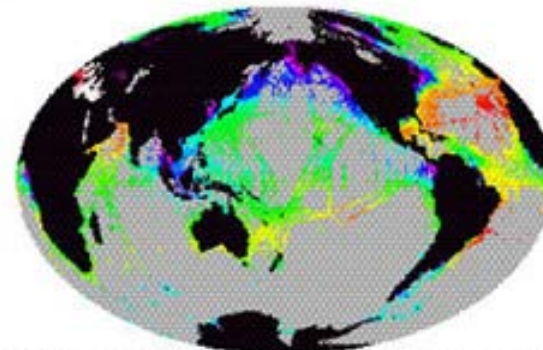
Salinité moyenne de surface de l'océan



8 jours
de mesures



Example 8 days of Aquarius Sea Surface Salinity (SSS) data



100 years of Sea Surface Salinity (SSS) measurements

100 ans
de mesures



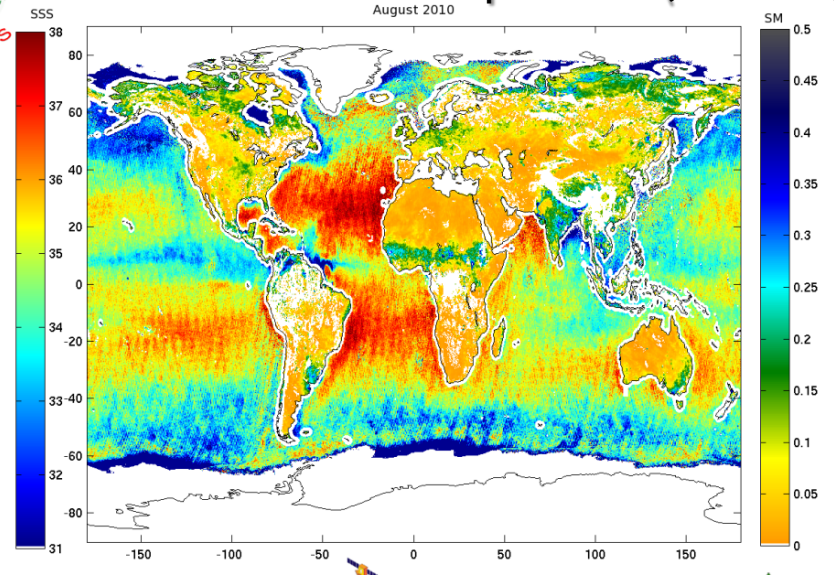
SMOS (Soil Moisture-Ocean Salinity)



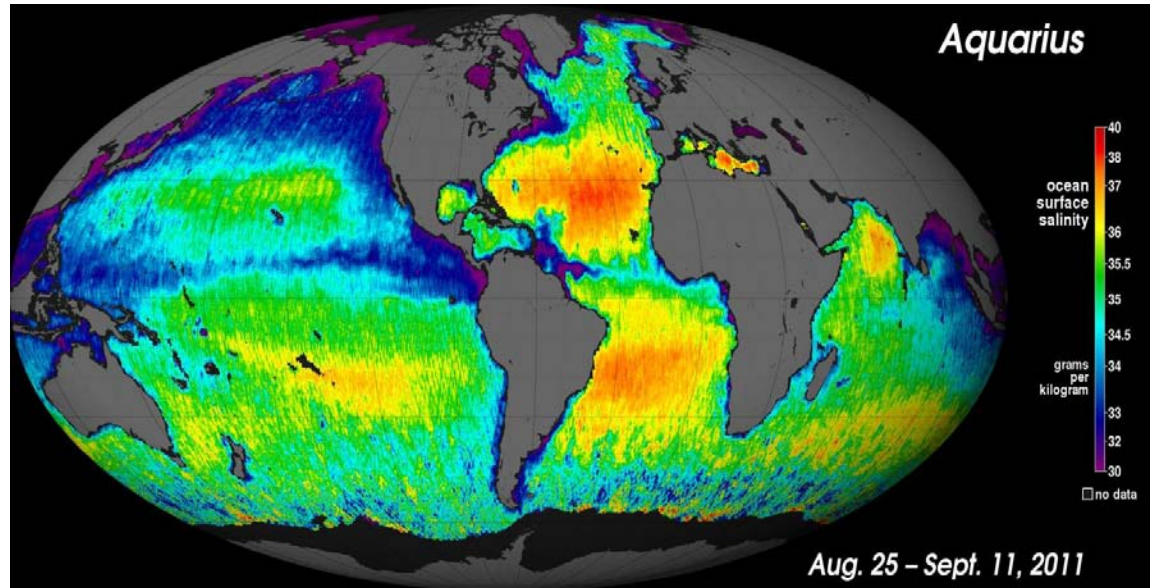
mission ESA (2009)



Salinité de surface mesurée par SMOS (août 2010)



Salinité de surface mesurée par Aquarius (NASA)

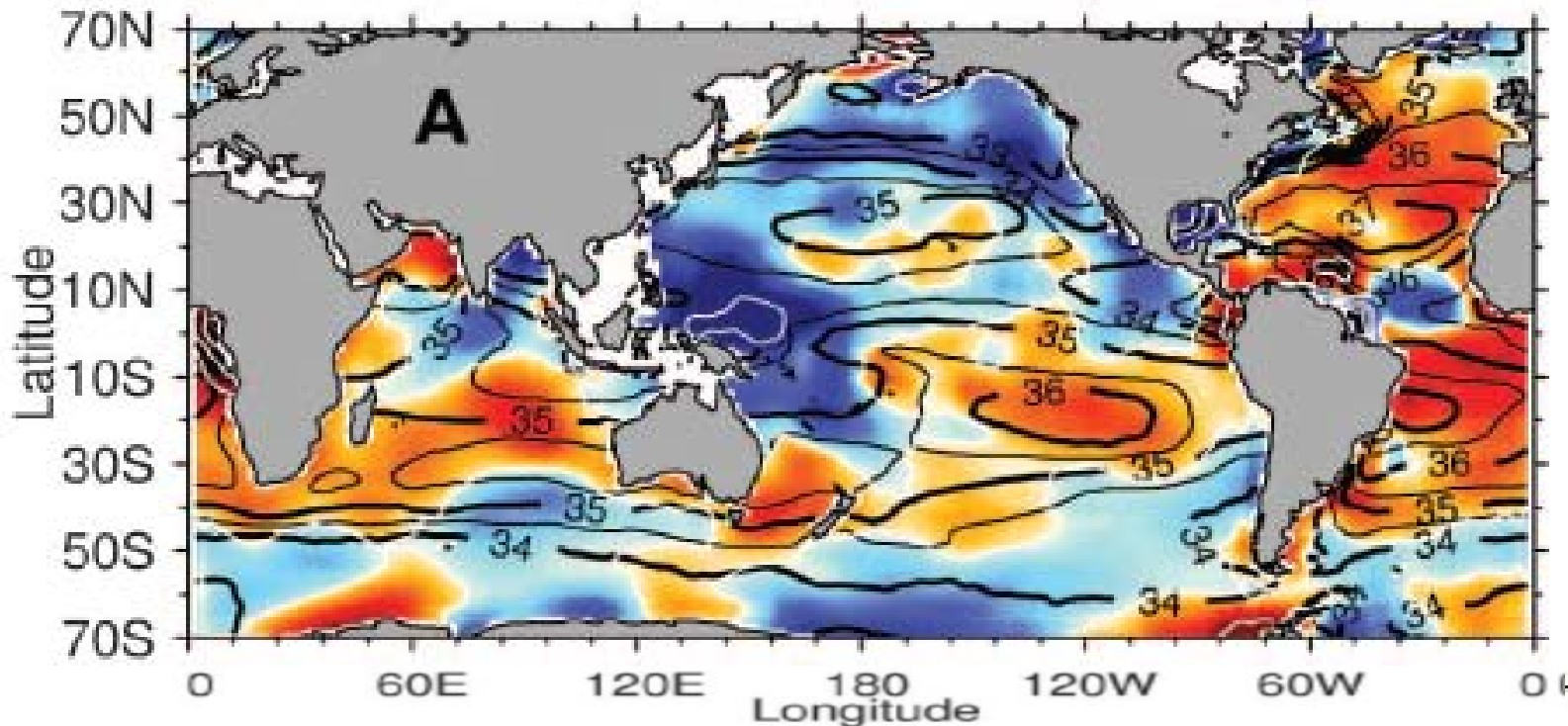


Pourquoi est-il important de connaître la salinité de surface de la mer?

- Impact sur la densité de l'eau → sur la dynamique de l'océan et le transport de la chaleur
- Lien direct avec les échanges d'eau avec l'atmosphère
 - la distribution géographique de la salinité de surface est directement corrélée à celle de E-P (évaporation moins précipitation sur l'océan)
 - Indicateur des variations du cycle de l'eau

Variations de salinité de l'océan: tendances entre 1950 et 2000 → intensification du cycle de l'eau

Première évidence de l'intensification du cycle de l'eau



Rouge= plus salé → E-P croît

Bleu = moins salé → E-P décroît

E= évaporation, P=précipitation

Topex/Poseidon (1992)

Jason-1 (2001)

Jason-2 (2008)

ERS-1/2 (1991/1995)

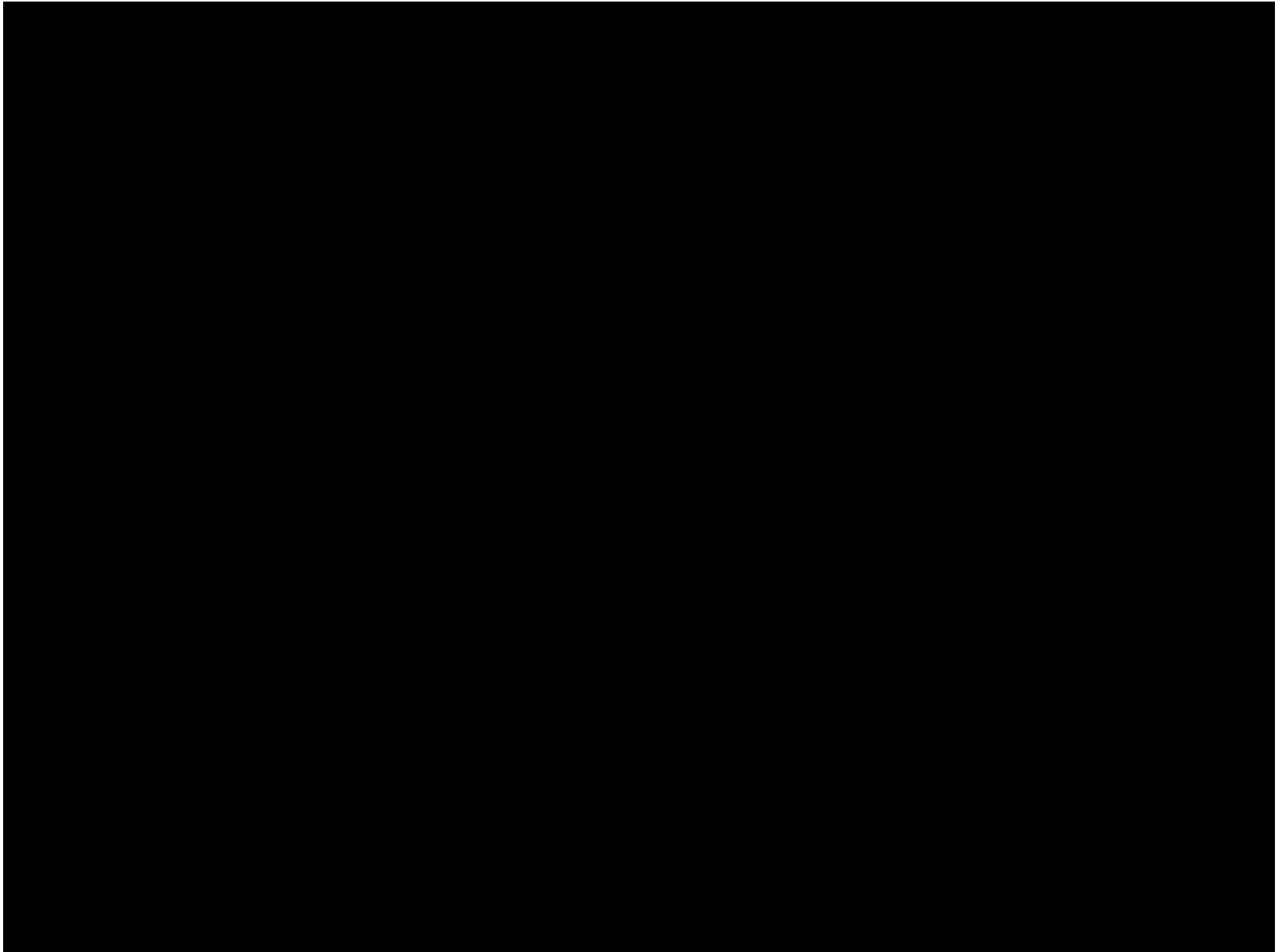
Envisat (2002)

Saral/AltiKa (2013)

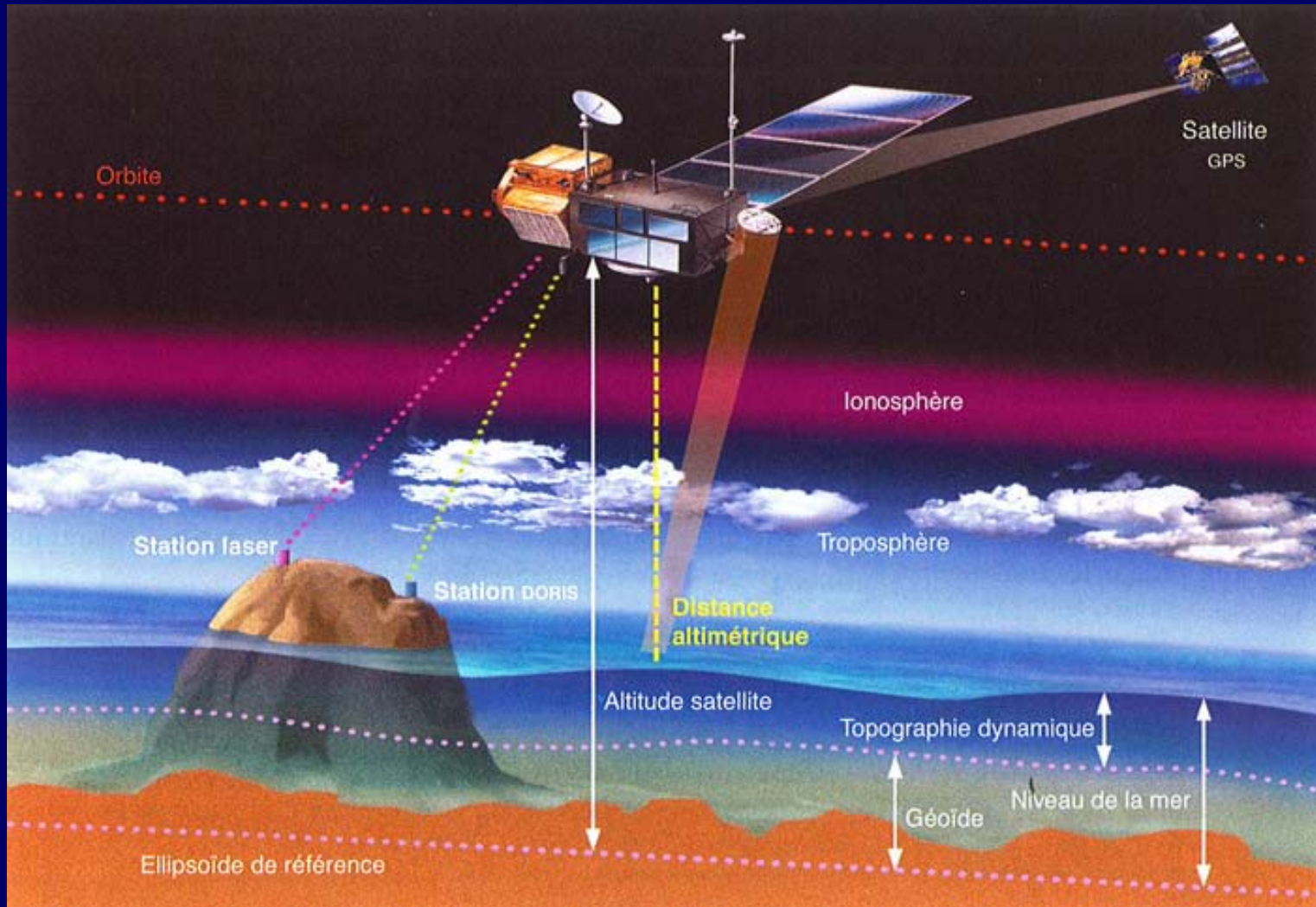
Altimétrie spatiale

→ mesure de la topographie de la surface de la mer

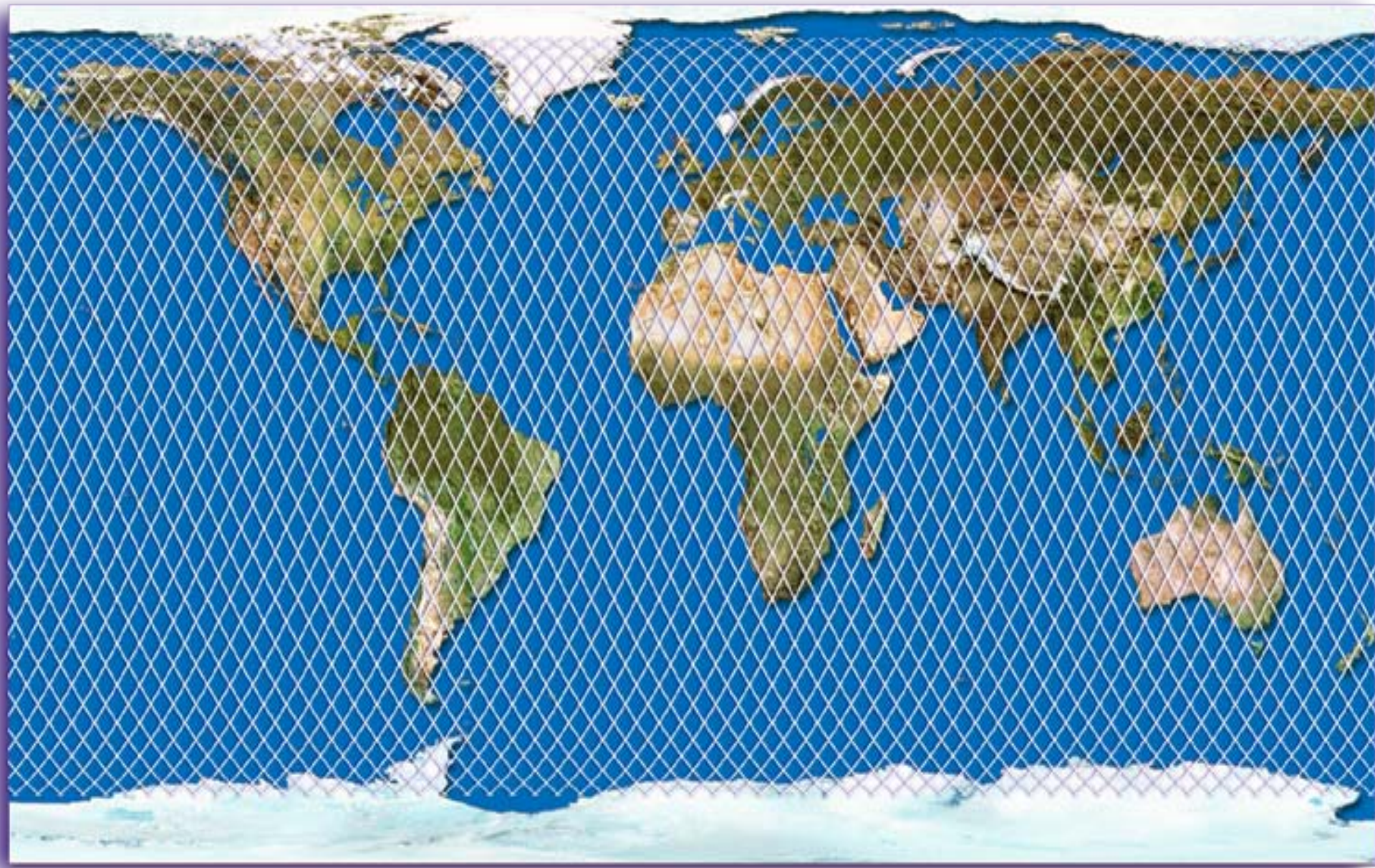
Principe de l'altimétrie par satellite



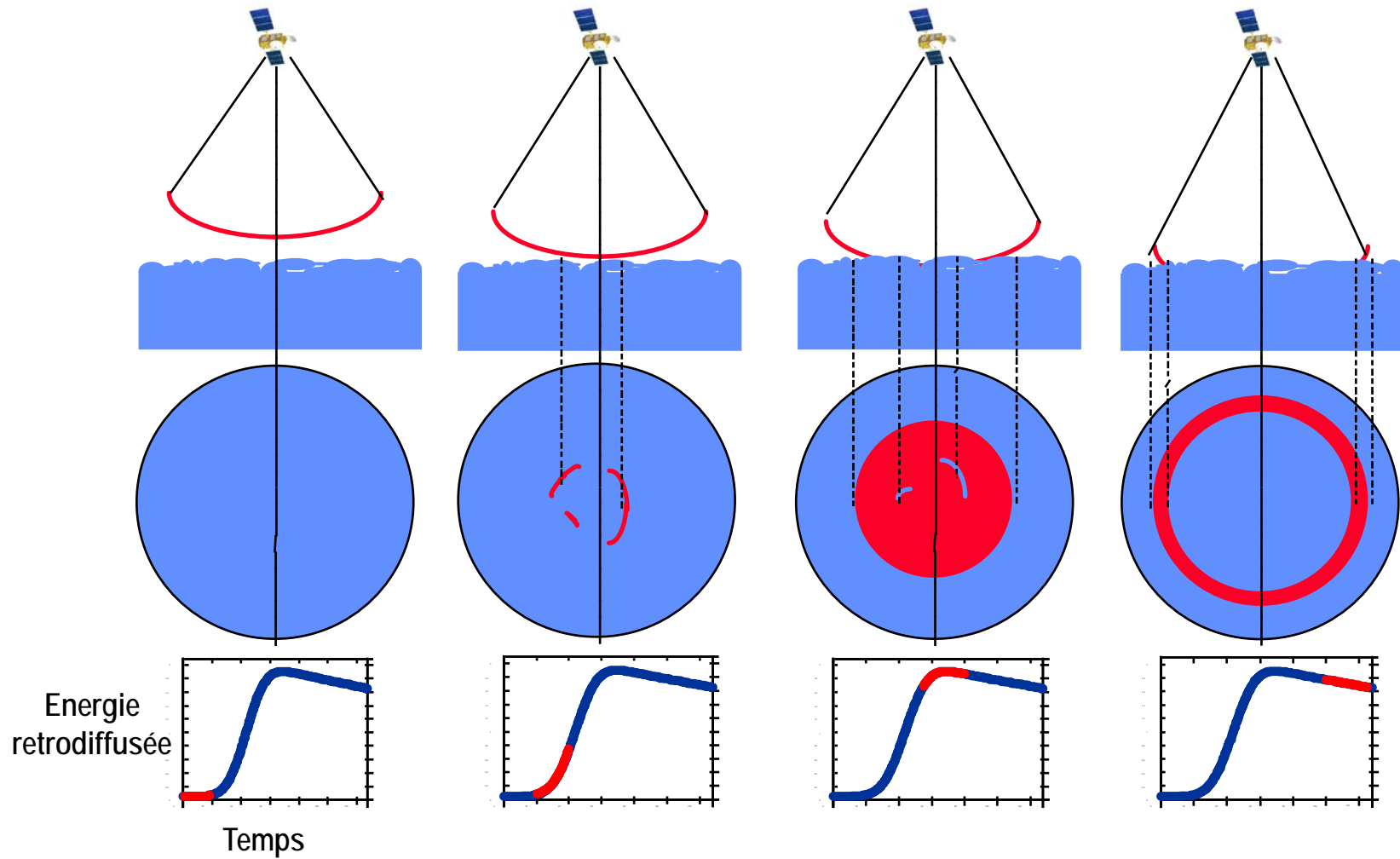
Principe de la mesure altimétrique



Couverture des océans en 10 jours

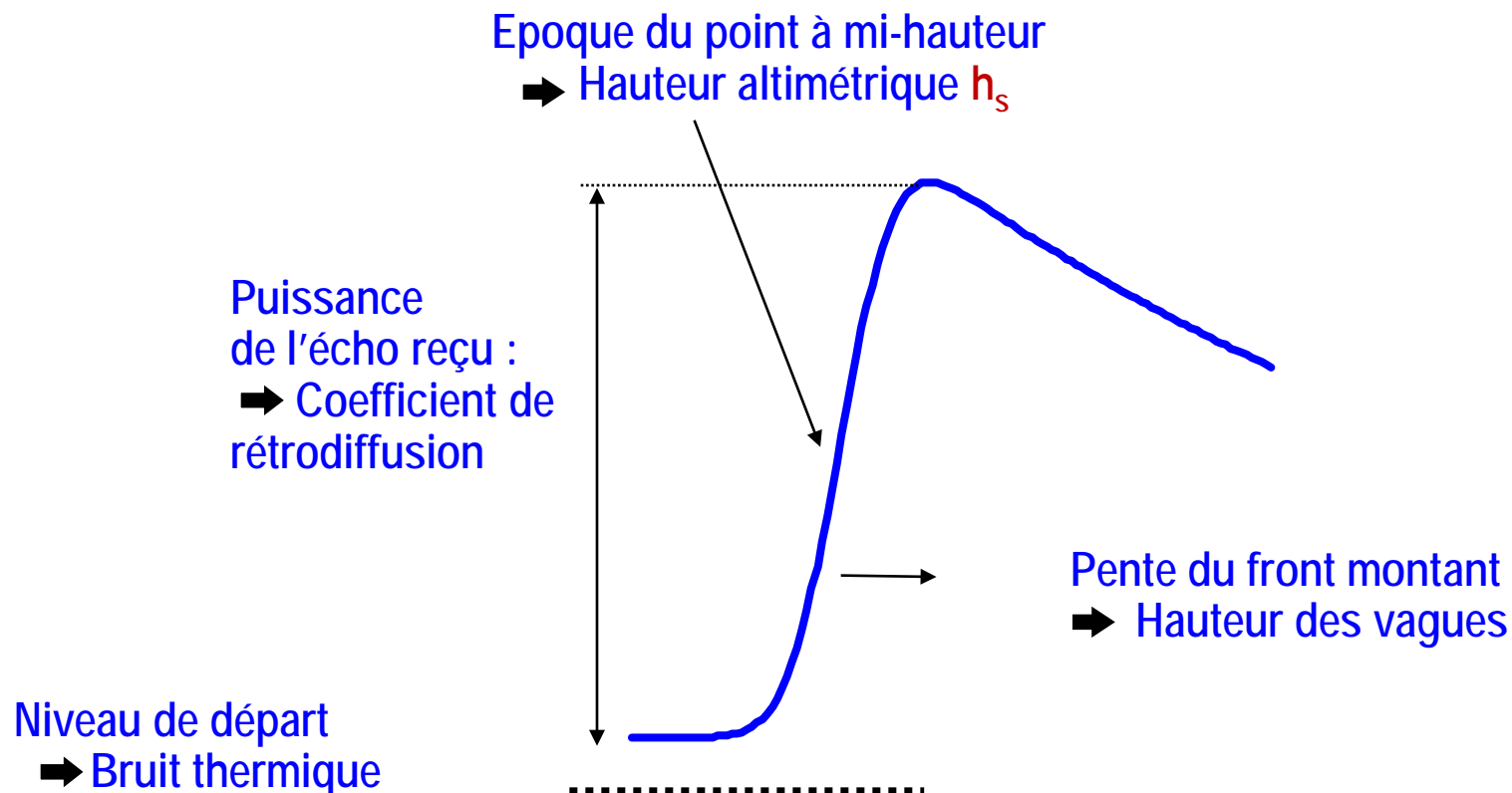


L'écho radar sur l'océan

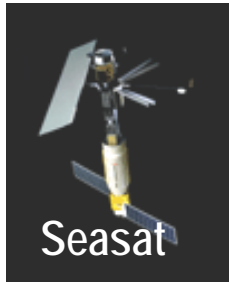


Forme de l'écho radar après réflexion sur la mer

Outre l'altitude du satellite au dessus du niveau de la mer (Hauteur altimétrique h_s), la forme de l'écho radar permet de calculer d'autres paramètres: hauteur des vagues, vitesse du vent

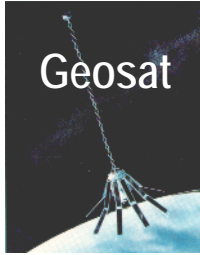


Les missions d'altimétrie spatiale



Seasat

1978



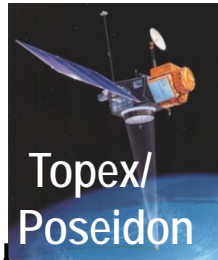
Geosat

1985



ERS-1/2

1991; 1995



Topex/
Poseidon

1992



Jason-1

2001



Envisat

2002



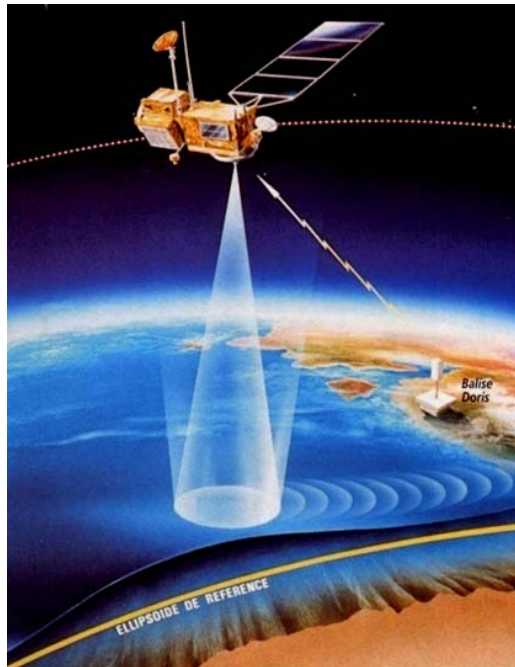
Jason-2

2008



Saral
AltiKa

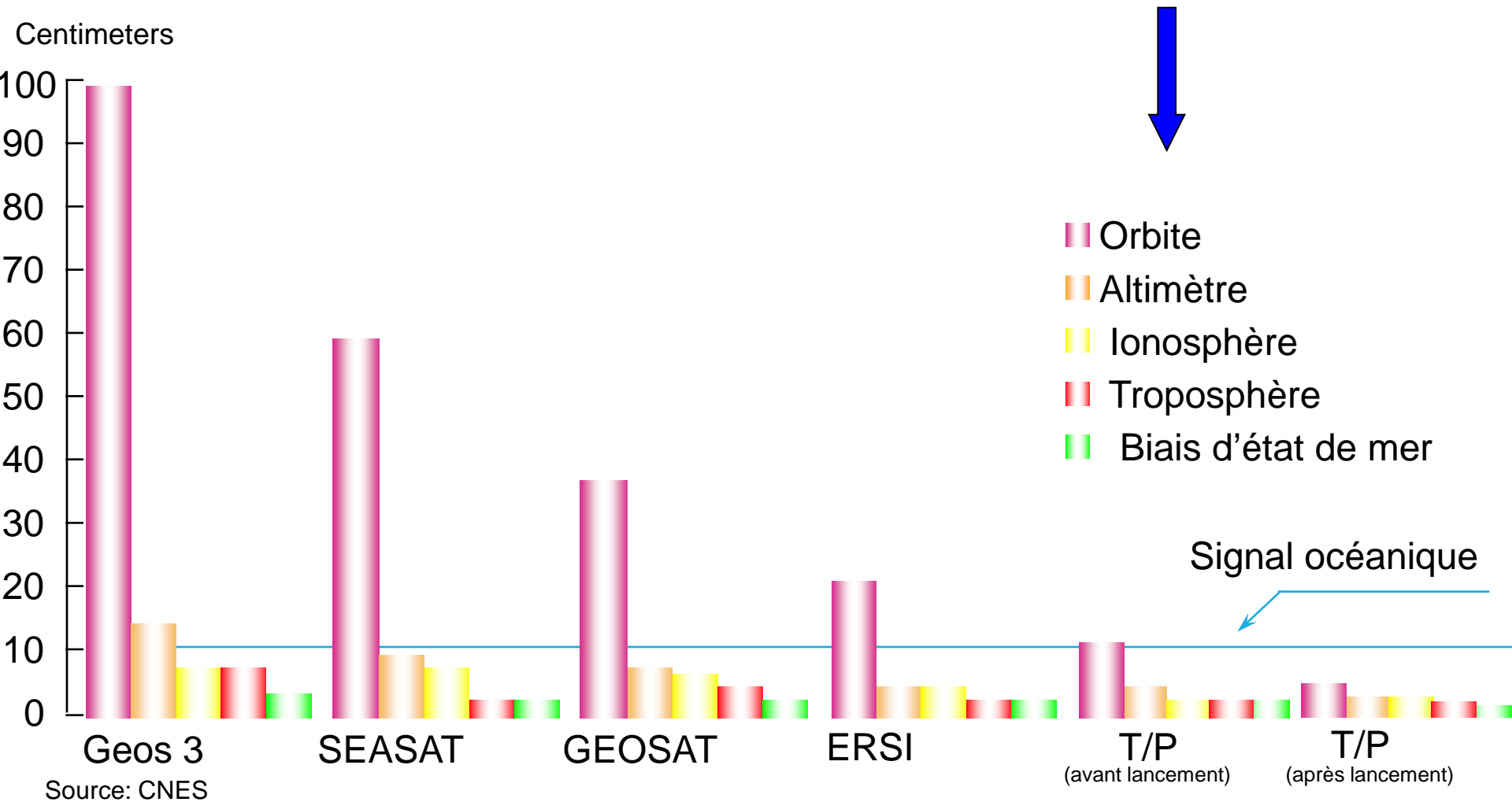
25 février 2013



→ 1992: début de l'altimétrie de haute précision:

Performance des missions altimétriques

- La précision de restitution de la topographie de surface de la mer est liée principalement à la maîtrise de 5 postes d'erreur



Une filière de satellites altimétriques de haute précision...

Jason-3

(Europe-USA):

Décidé, lancement 2015

- *Monitoring du climat et du niveau de la mer*
- *Océanographie opérationnelle*



Et aussi:

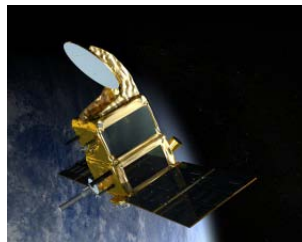
SARAL/AltiKa

Lancement 25 février 2013

Mission franco-indienne

Altimètre en bande Ka

Couverture géographique : +/- 89°



Les applications océanographiques de l'altimétrie spatiale

- Courants → circulation océanique grande échelle et petite échelle
- Marées océaniques
- El Nino, La Nina
- Autres modes de variabilité interne du système atmosphère-océans (oscillation nord atlantique, ...)
- Niveau de la mer et climat
- Océanographie opérationnelle (prévisions de l'état de l'océan 1-2 semaines à l'avance)

La circulation océanique

dépend de :

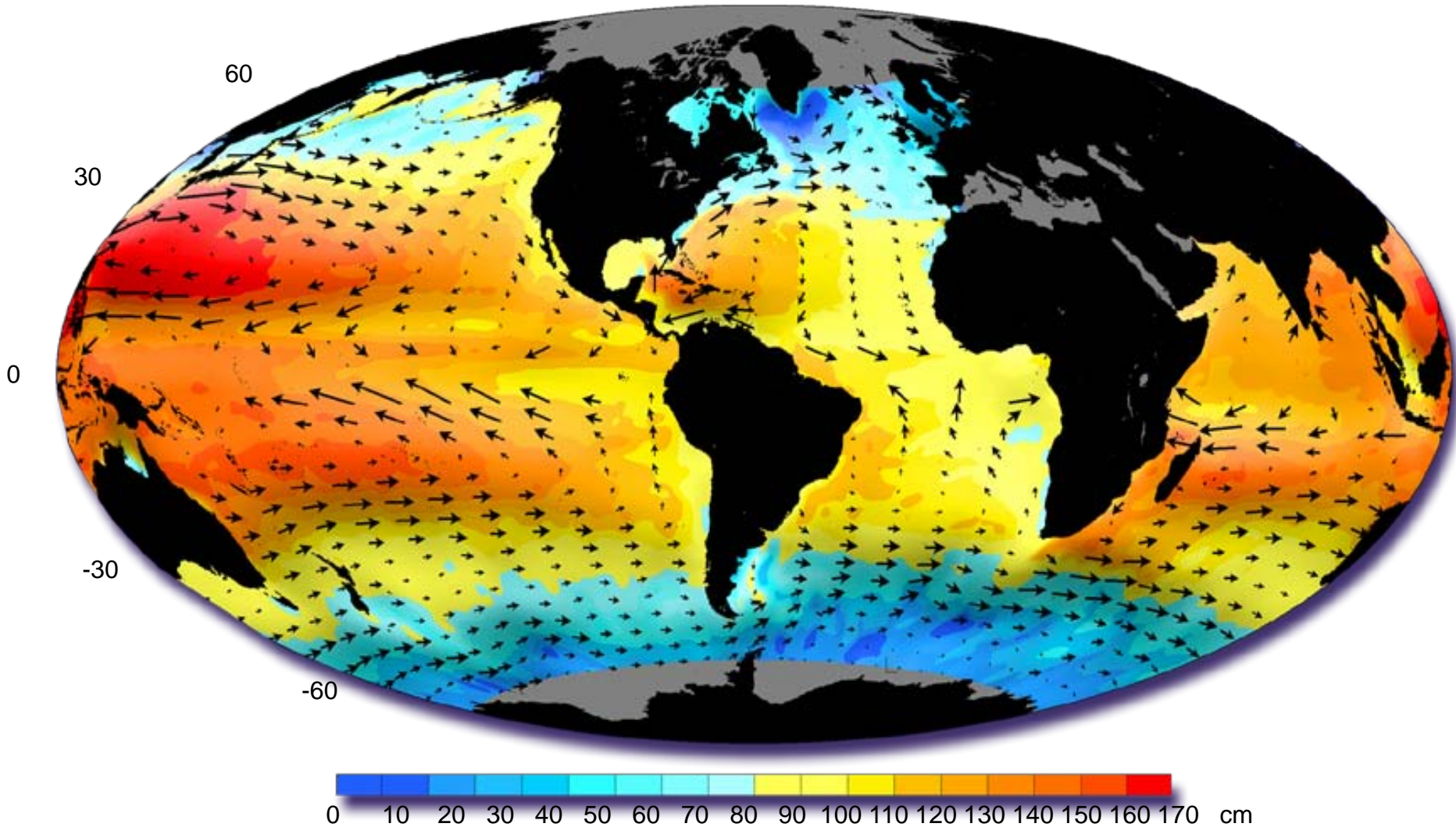
- force de gravité
- forces de frottement à l'interface air-mer (vents de surface)
- forces de gradient de pression (variations de température et de salinité de la colonne d'eau + accumulations d'eau par le vent)
- force de Coriolis (rotation de la Terre)
- forces astronomiques (marées)

Localement , le frottement du vent sur la surface crée un courant superficiel

La circulation océanique à grande échelle résulte essentiellement d'un état d'équilibre entre le **gradient horizontal de pression** et la **force de Coriolis** (**équilibre géostrophique**)

Cartographie de la « **topographie dynamique** » de l'océan → signature de la circulation 'géostrophique' due aux masses d'eau poussées par les vents et aux variations de densité de la colonne d'eau (variations de température et salinité)

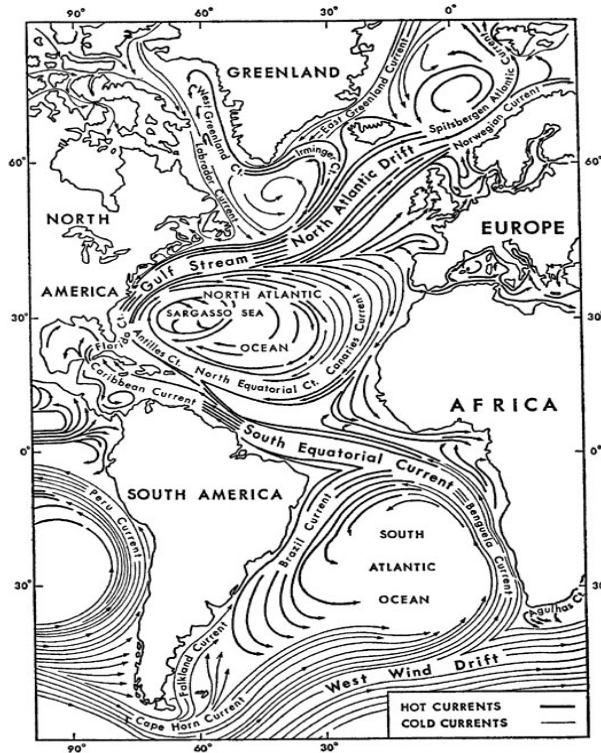
Topographie 'dynamique' de l'océan (au dessus du géoïde)
→ vitesse du courant proportionnelle à la pente de la surface



La circulation océanique est l' image de la circulation atmosphérique (couplage océan-atmosphère)

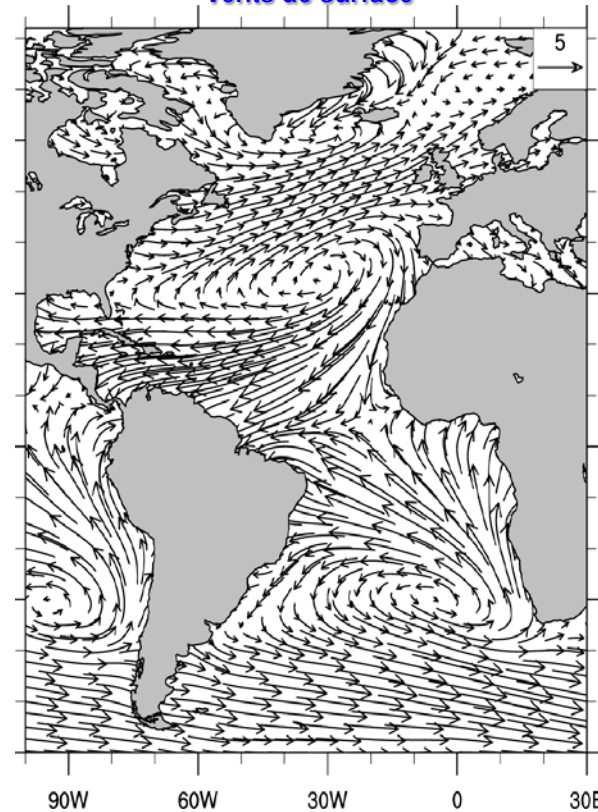
Le Gulf Stream est le courant de bord-ouest de l'anticyclone des Açores

Courants de surface



The whole Atlantic circulation

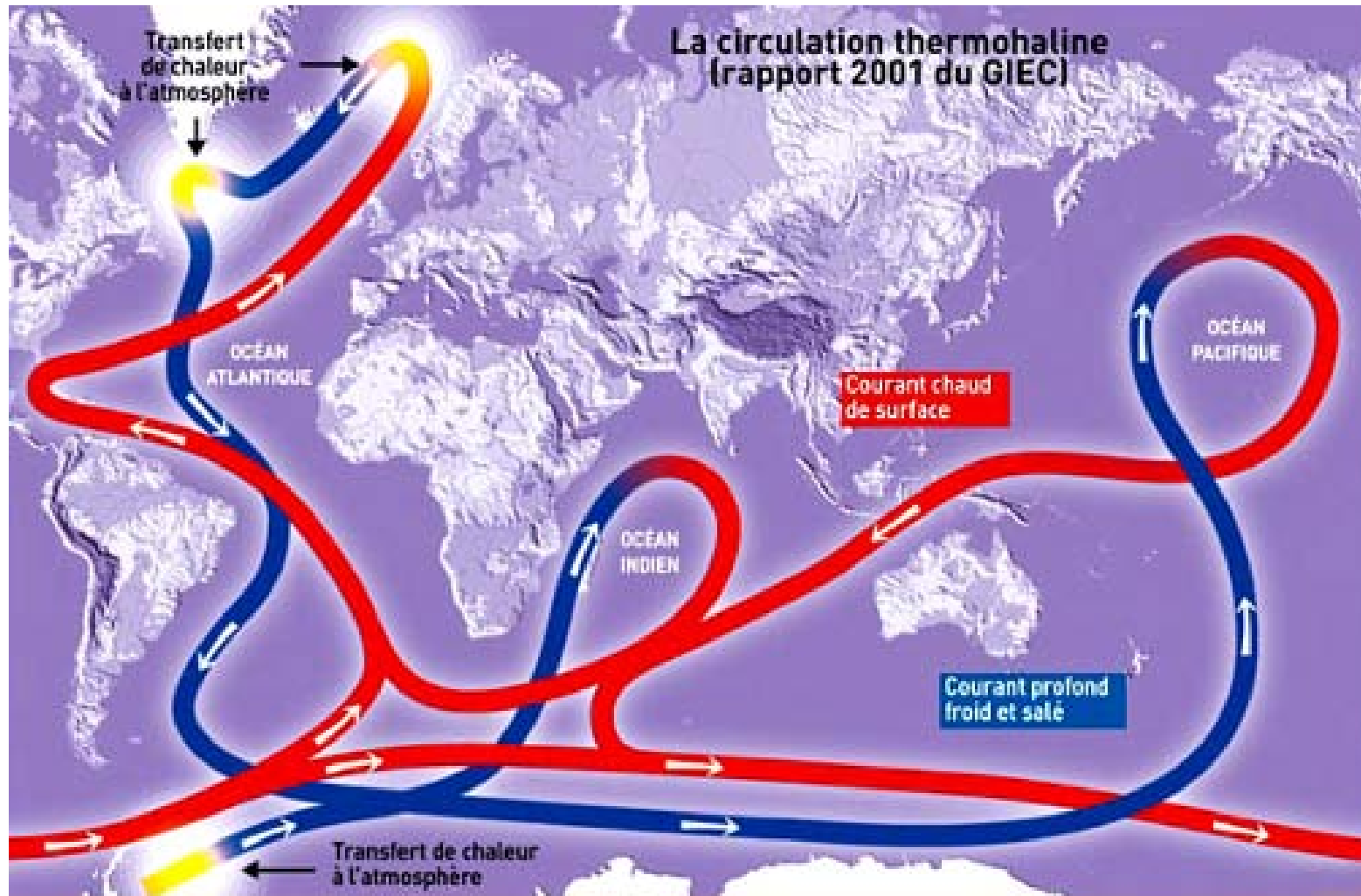
Vents de surface



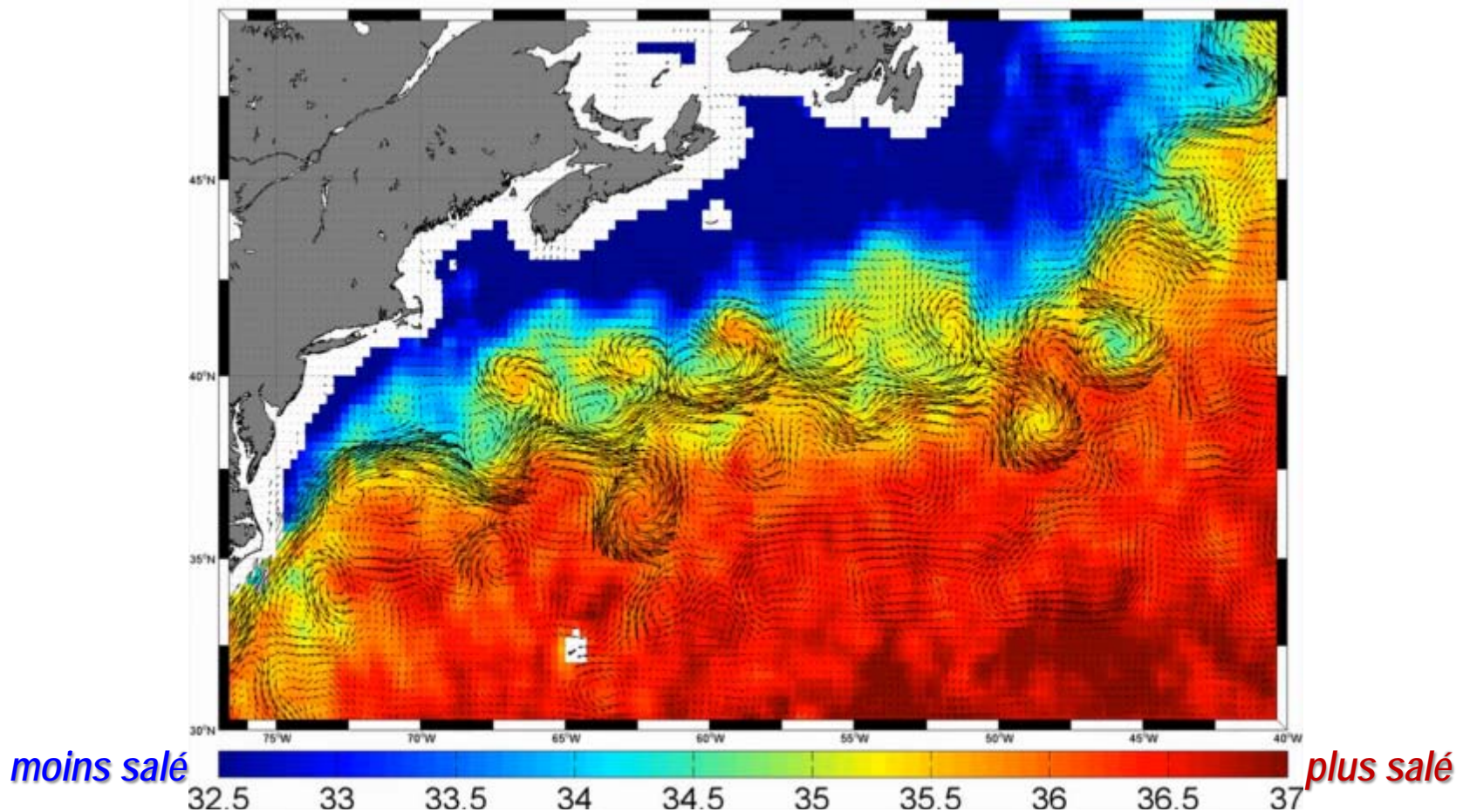
La topographie 'dynamique' de la surface de la mer est pour l'océan l'équivalent de la pression atmosphérique. Comme on déduit le vent du champ de pression atmosphérique, on déduit les courants de la topographie de la surface qui représente le « *Champ de pression océanique* »

La circulation thermohaline

(bleu= courants profonds; rouge = courants de surface)

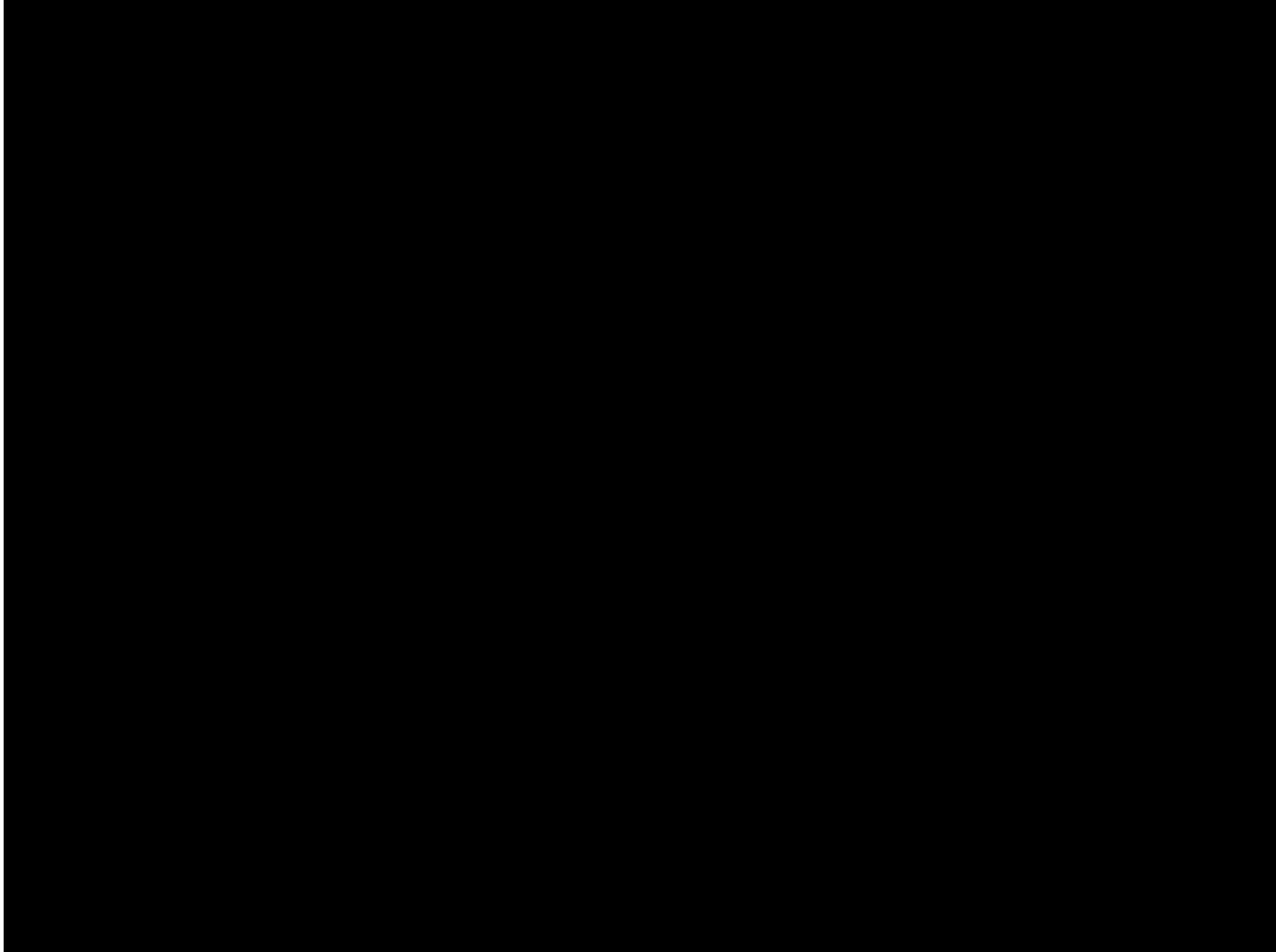


Les méandres du Gulf Stream

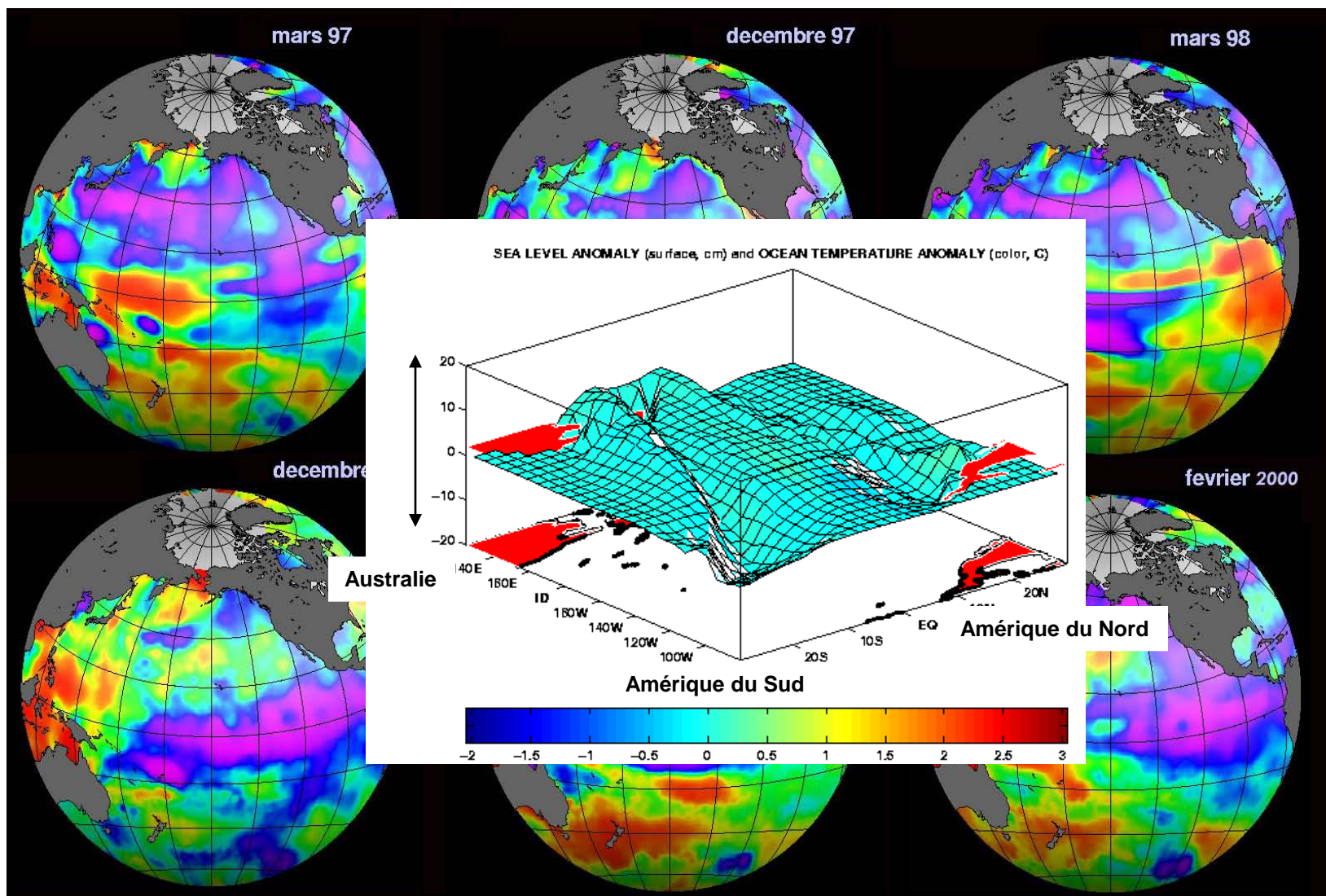


Courants d'après l'altimétrie et salinité de l'océan d'après le satellite SMOS

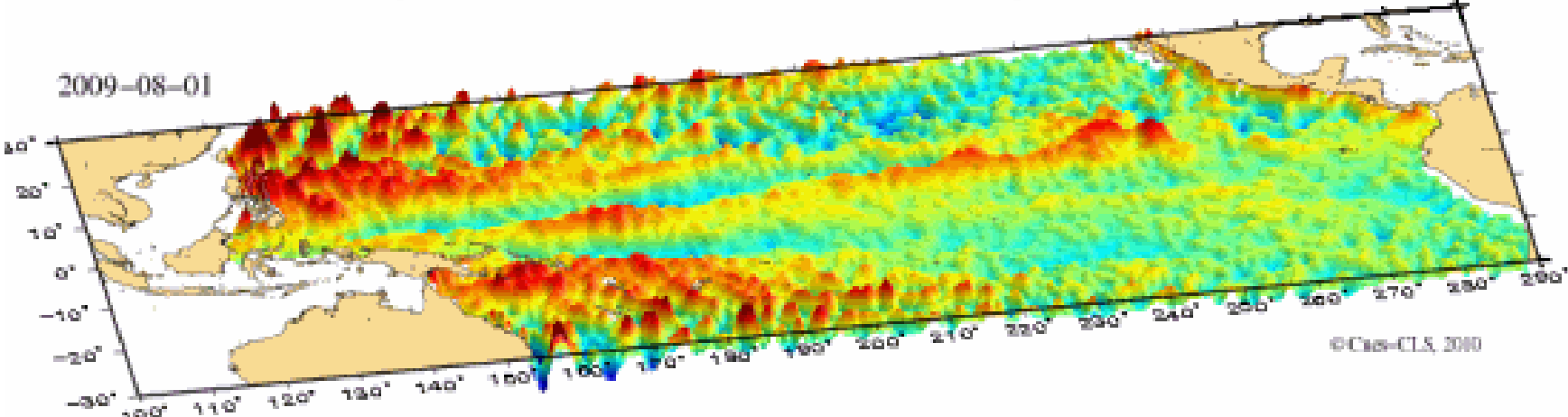
La circulation océanique



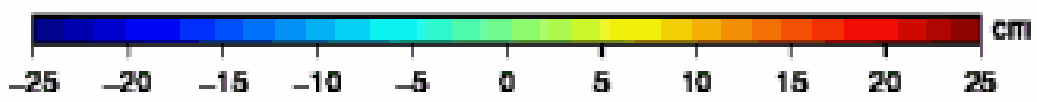
El Niño et La Niña de 1997-1998 vus par TOPEX/POSEIDON



El Nino vu par le satellite altimétrique Jason-2



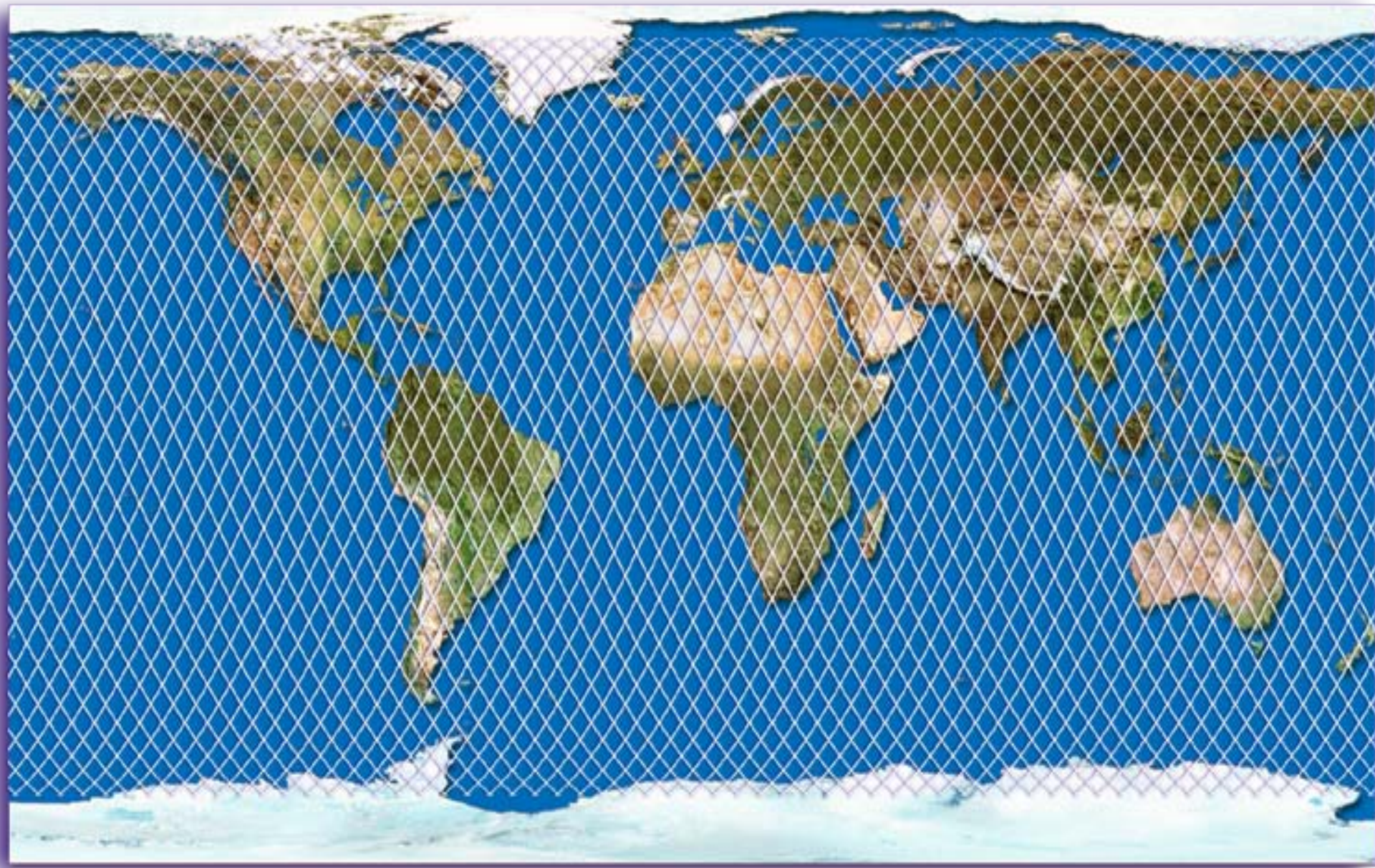
Hauteur de la mer dans le Pacifique tropical en 2009 - 2010



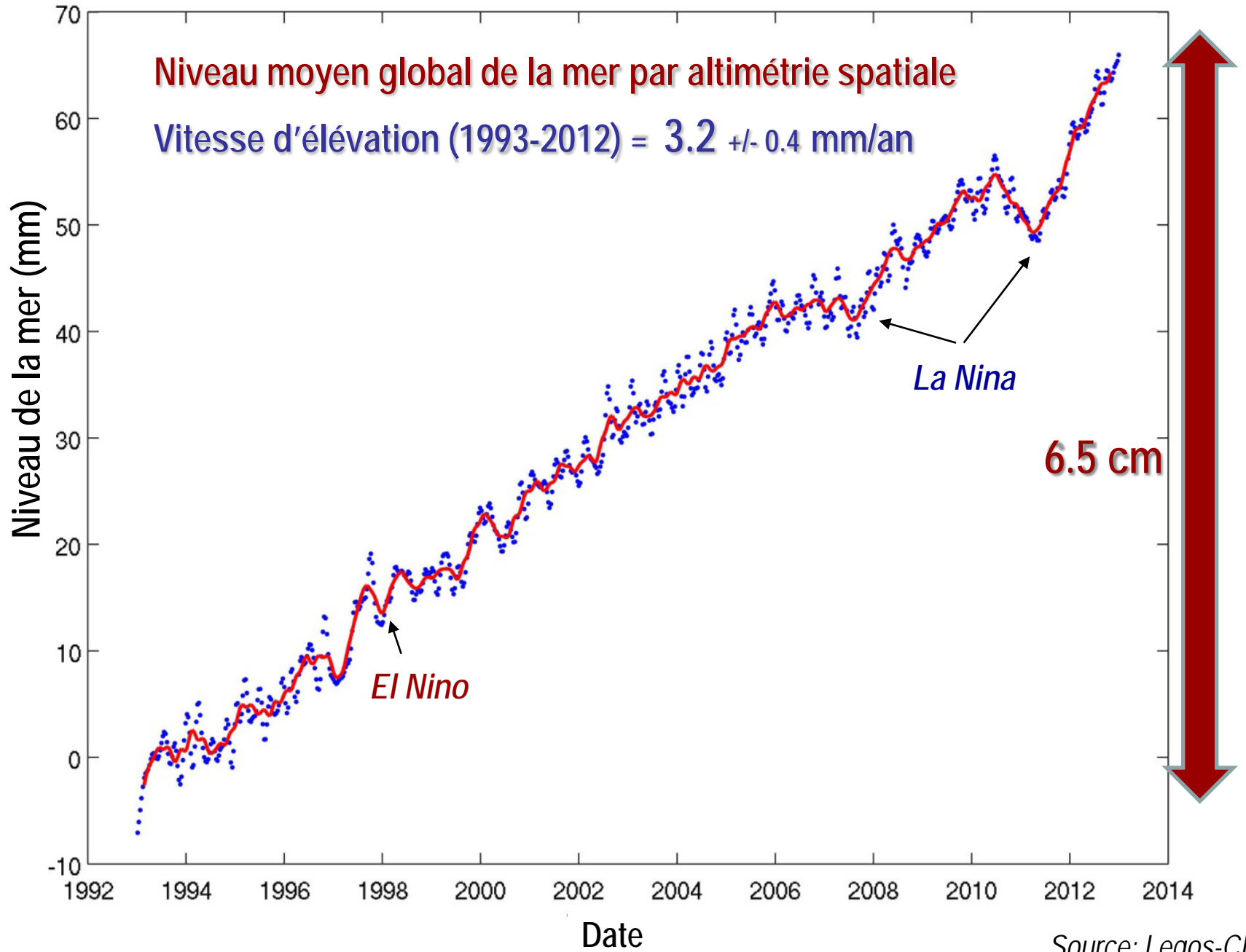
A satellite with a yellow body and blue solar panels is shown in orbit above a large, curling ocean wave. The satellite is positioned in the upper left quadrant, looking down at the wave. The wave is a deep green color with white foam at its crest. The background is a clear blue sky.

La mesure des variations du niveau de la mer
par altimétrie spatiale

Couverture des océans en 10 jours



Updated: 14/03/2013



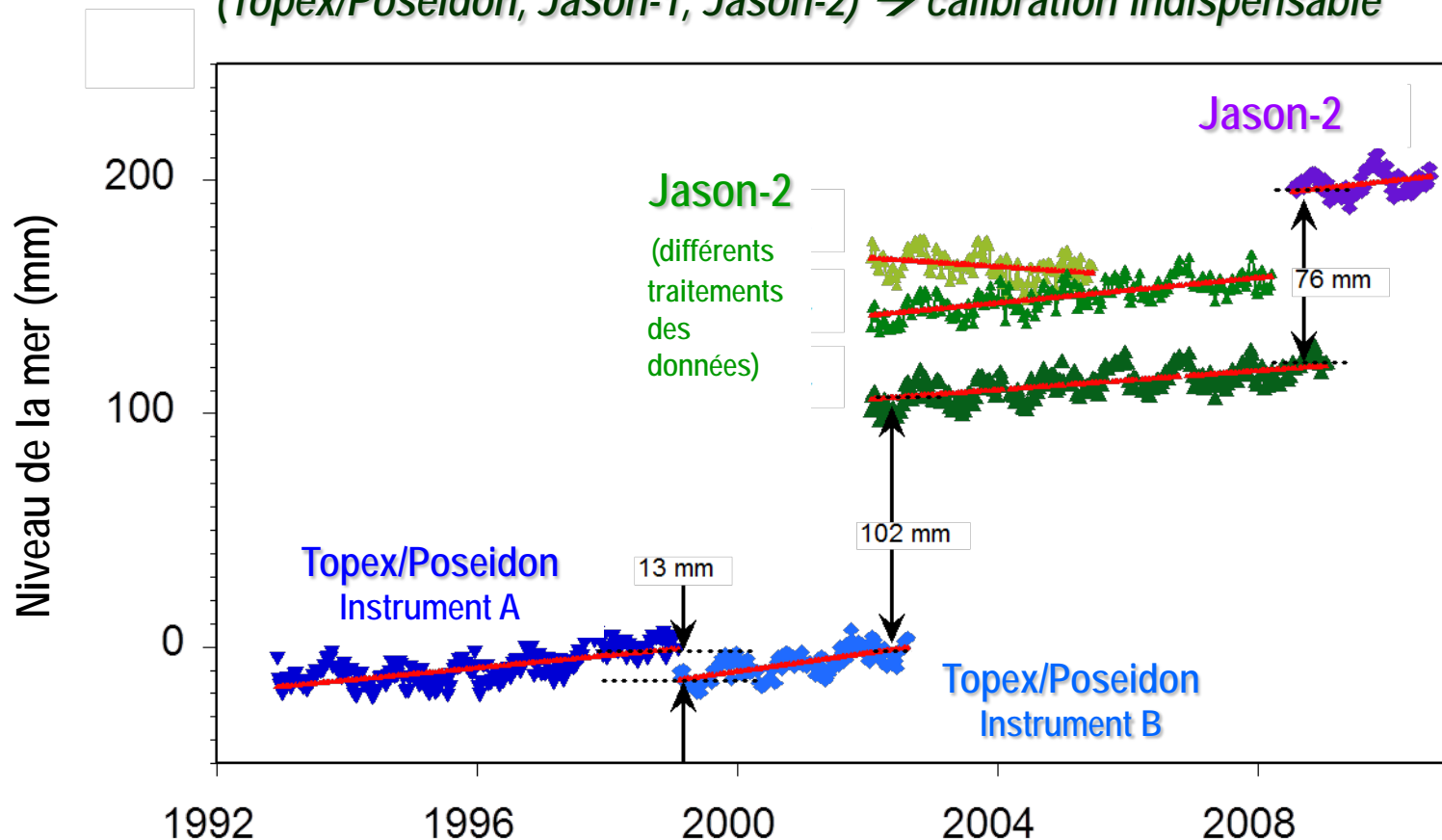
Estimation du bilan d'erreur

Source	Erreurs sur la tendance (mm/an)
Erreur d'orbite	~-0.25
<u>Correction troposphère humide (dérive instrumentale des radiomètres de bord)</u>	~-0.3
Biais instrumental altimètres (Topex A-Topex B)	~-0.25
Correction troposphère sèche (incertitude des champs de pression atmosphérique)	~-0.1
Correction « état de la mer »	~-0.1
<i>Effet total</i>	<i>~0.4</i>
Comparaison avec les marégraphes	~-0.4

La mesure du niveau de la mer → application la plus 'exigeante' de l'altimétrie spatiale

- Nécessité d'avoir des séries longues et homogènes de mesure
- Problème du 'raccordement' des missions altimétriques → nécessité d'avoir des missions en 'tandem' pendant un certain temps

*Exemple de 'biais altimétrique' entre missions successives
(Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2) → calibration indispensable*



Question:

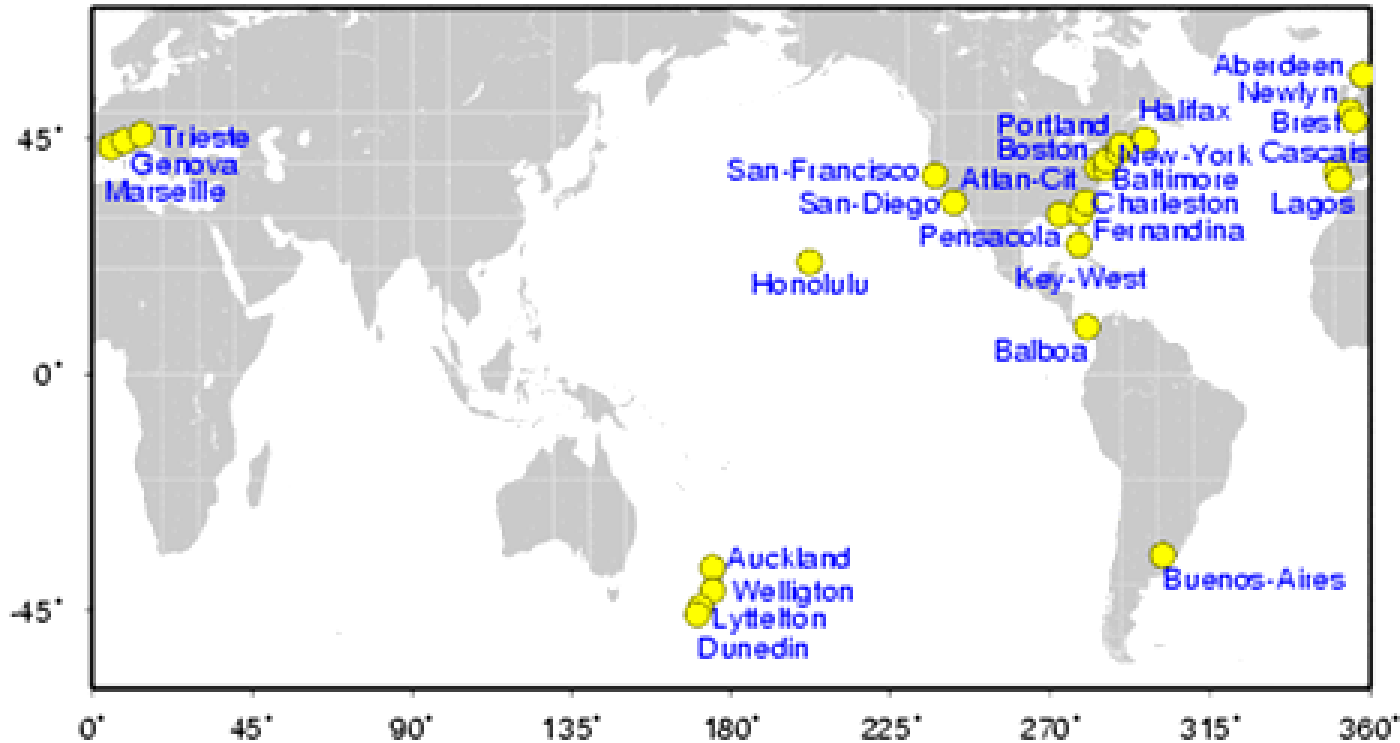
-Y a-t-il une accélération de la hausse du niveau de la mer par rapport aux dernières décennies?

Réponse : Oui



Réseau de marégraphes 'historiques'

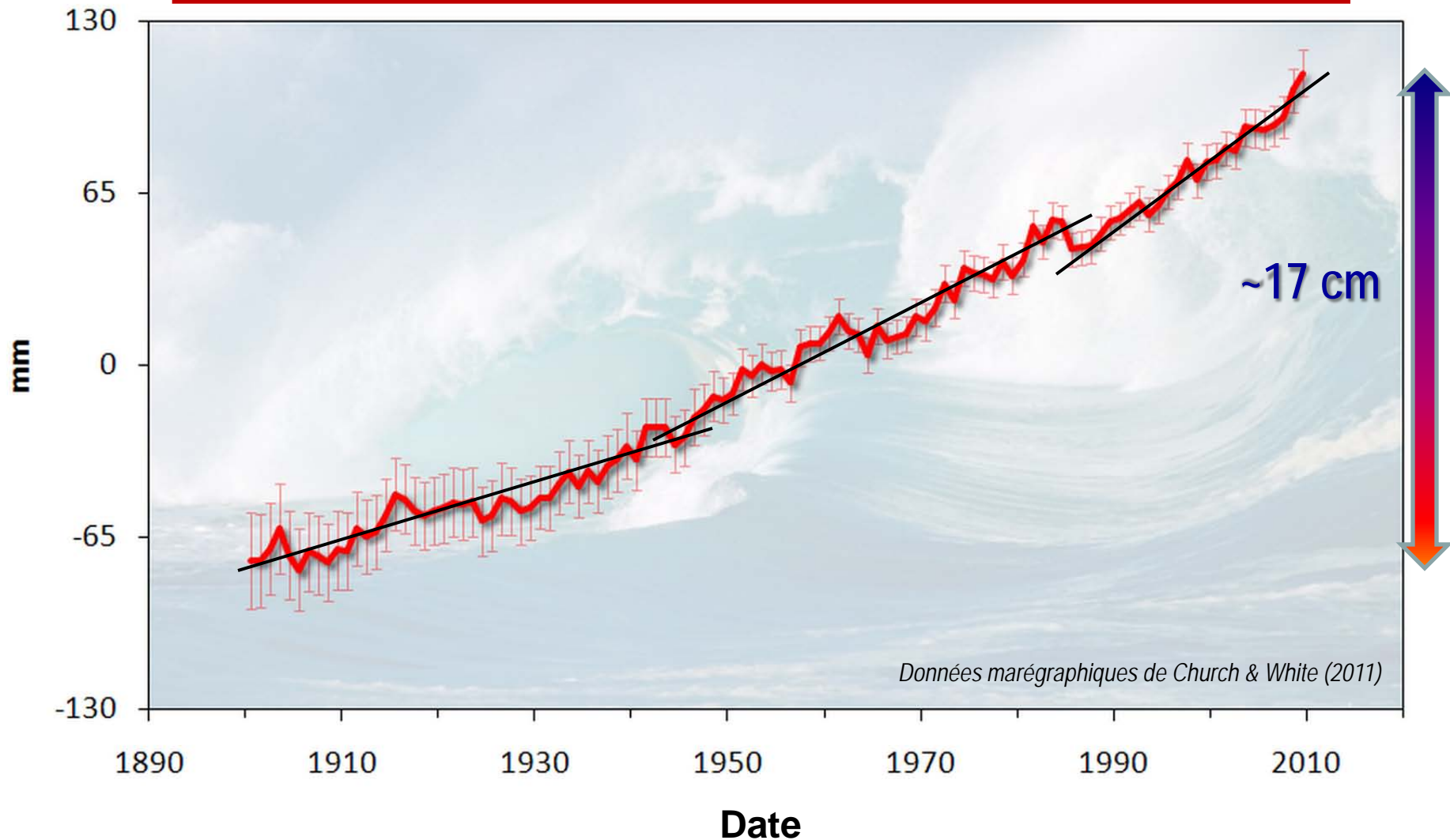
→ Enregistrements des variations du niveau de la mer au 20^{ème} siècle



La hausse de la mer au cours du 20^{ème} siècle (en rouge : marégraphes; en bleu : satellites altimétriques)



Hausse du niveau moyen global de la mer depuis 1900 observée par les marégraphes



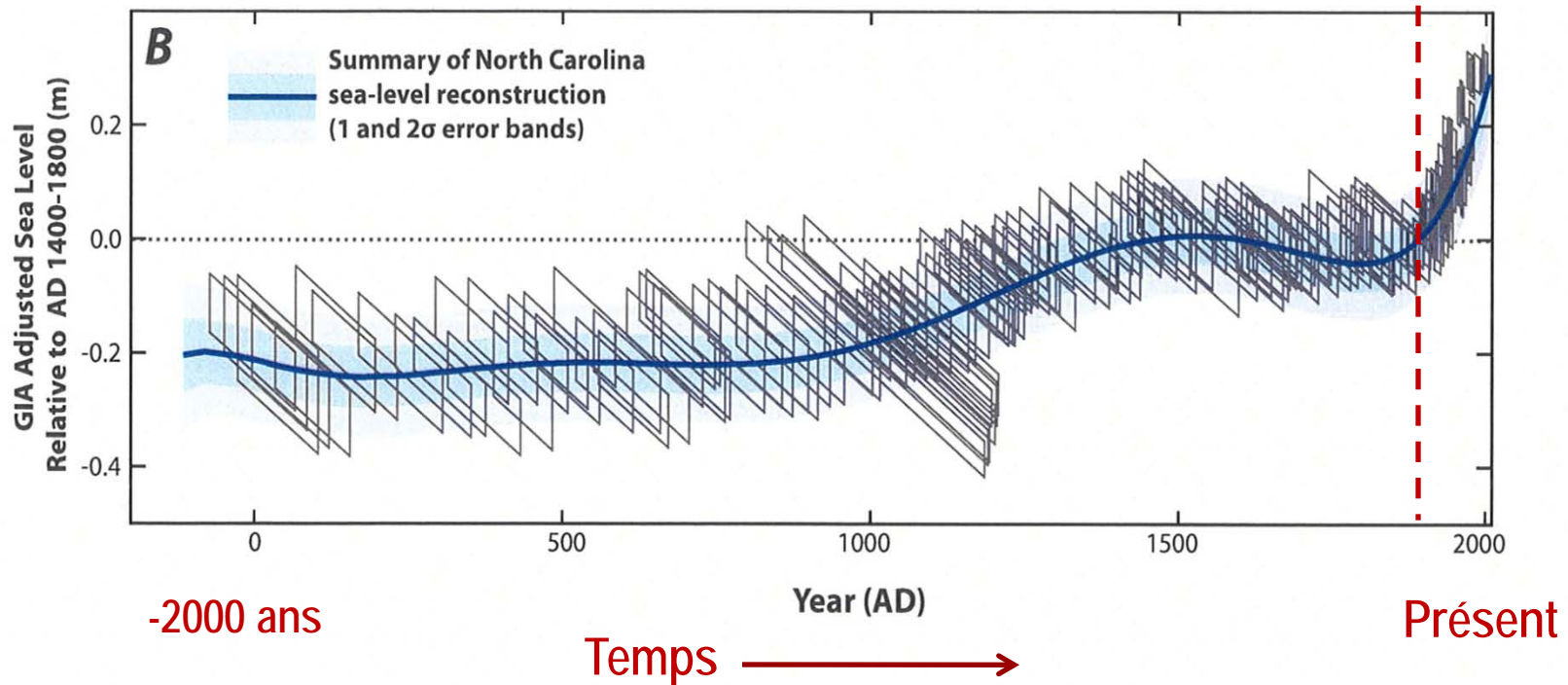
Question:

-La hausse actuelle est-elle 'anormale' en comparaison des derniers siècles/millénaires?

Réponse : oui et non

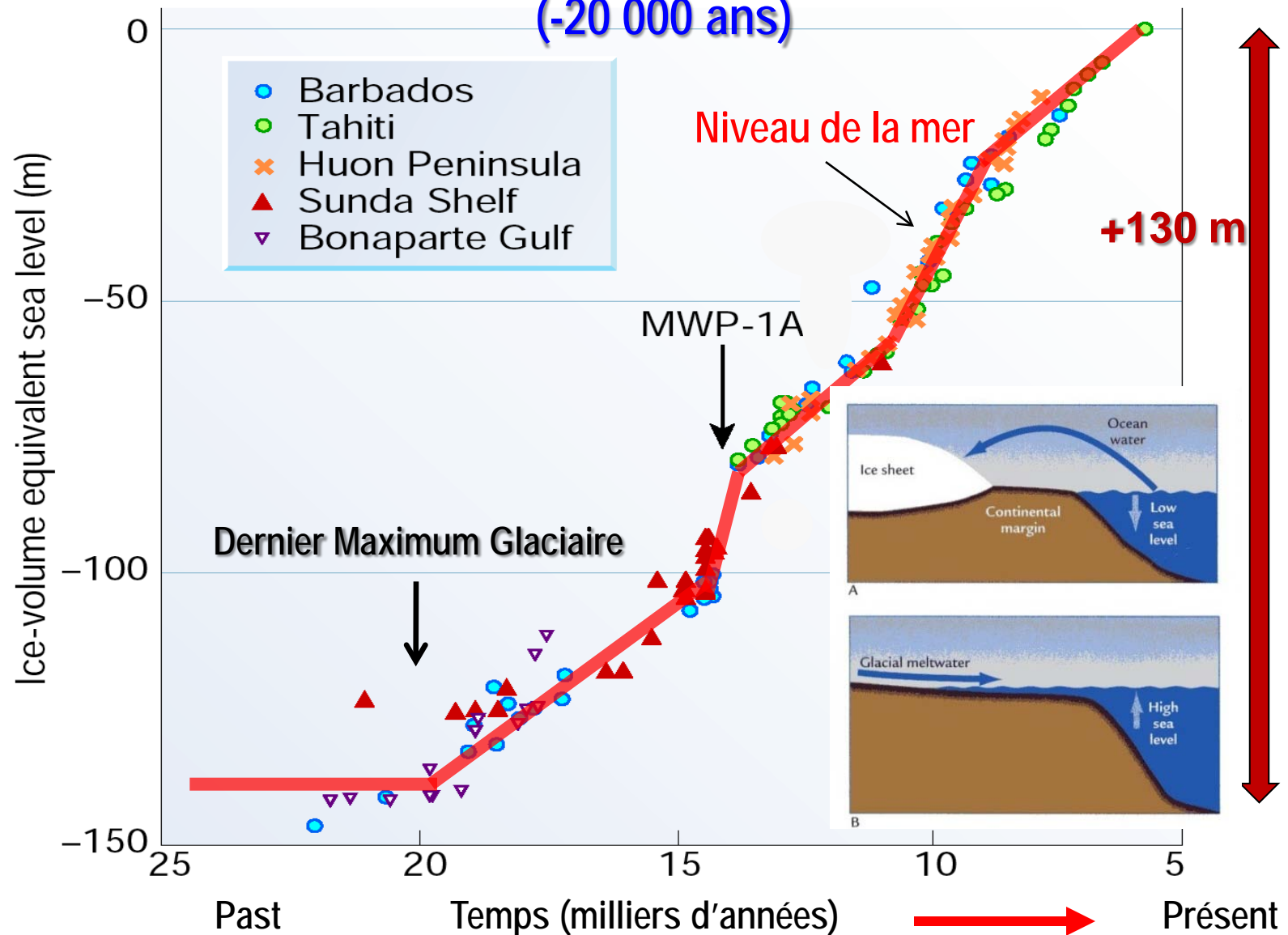


Niveau moyen de la mer depuis 2000 ans



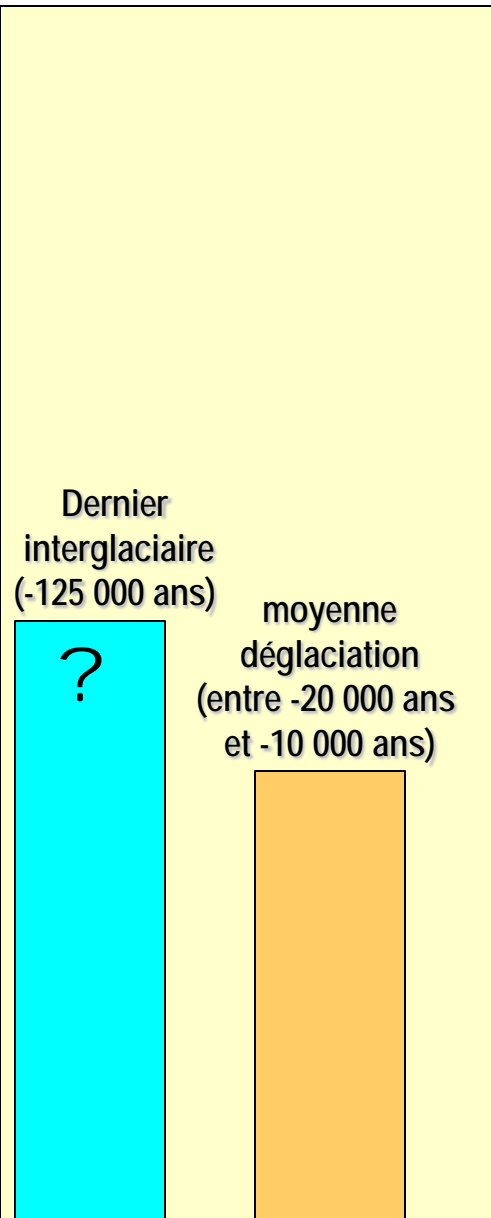
Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, la hausse n'a pas dépassé 0.5 mm/an !

Remontée du niveau de la mer depuis le dernier maximum glaciaire (-20 000 ans)



mm/an

32
28
24
20
16
12
8
4
0



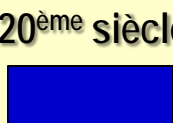
Vitesses d'élévation du niveau marin sur différentes échelles de temps

Déglaciation MWP-1A (-14 000 ans) (durée: 300 ans) → 40 mm/an

<0.5 mm/an
2 derniers millénaires

1.7 mm/an
20^{ème} siècle

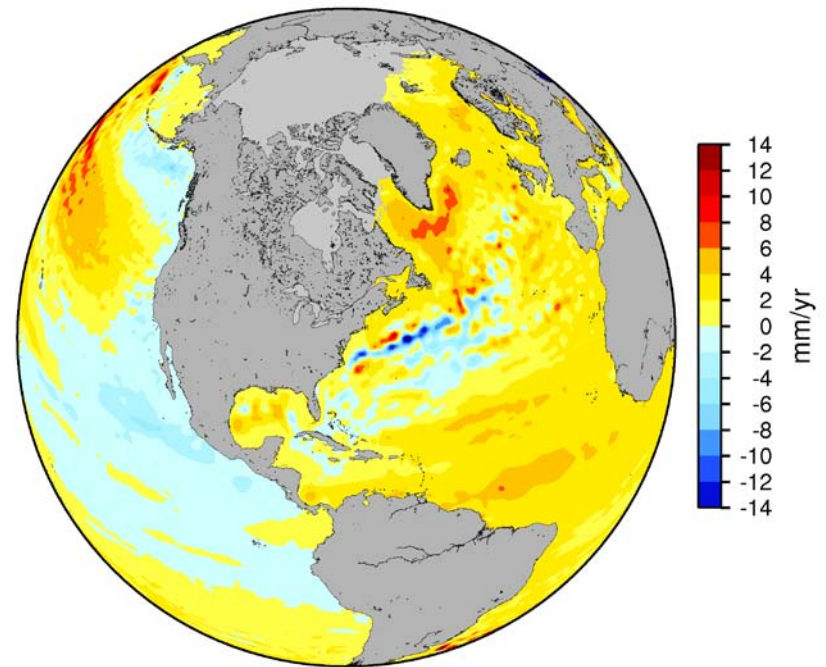
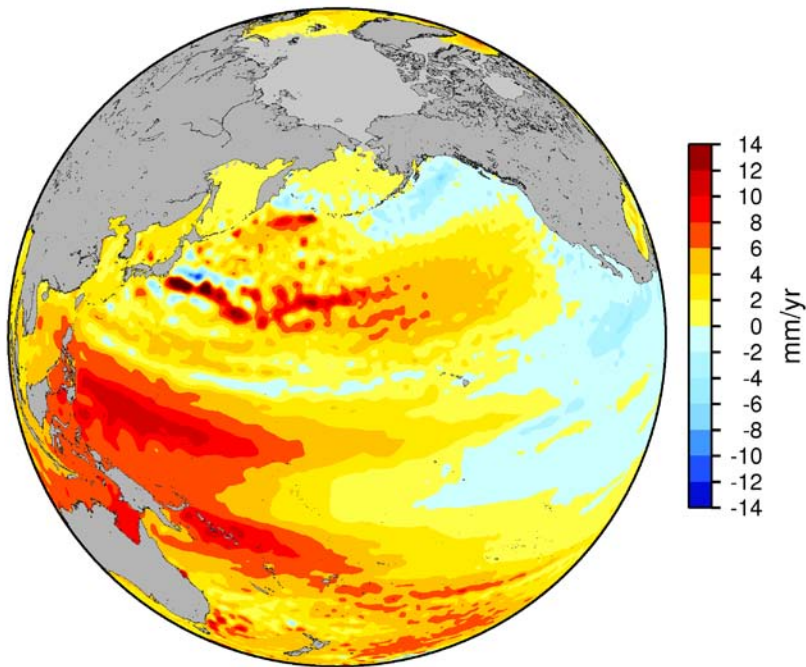
3.2 mm/an
2 dernières décennies



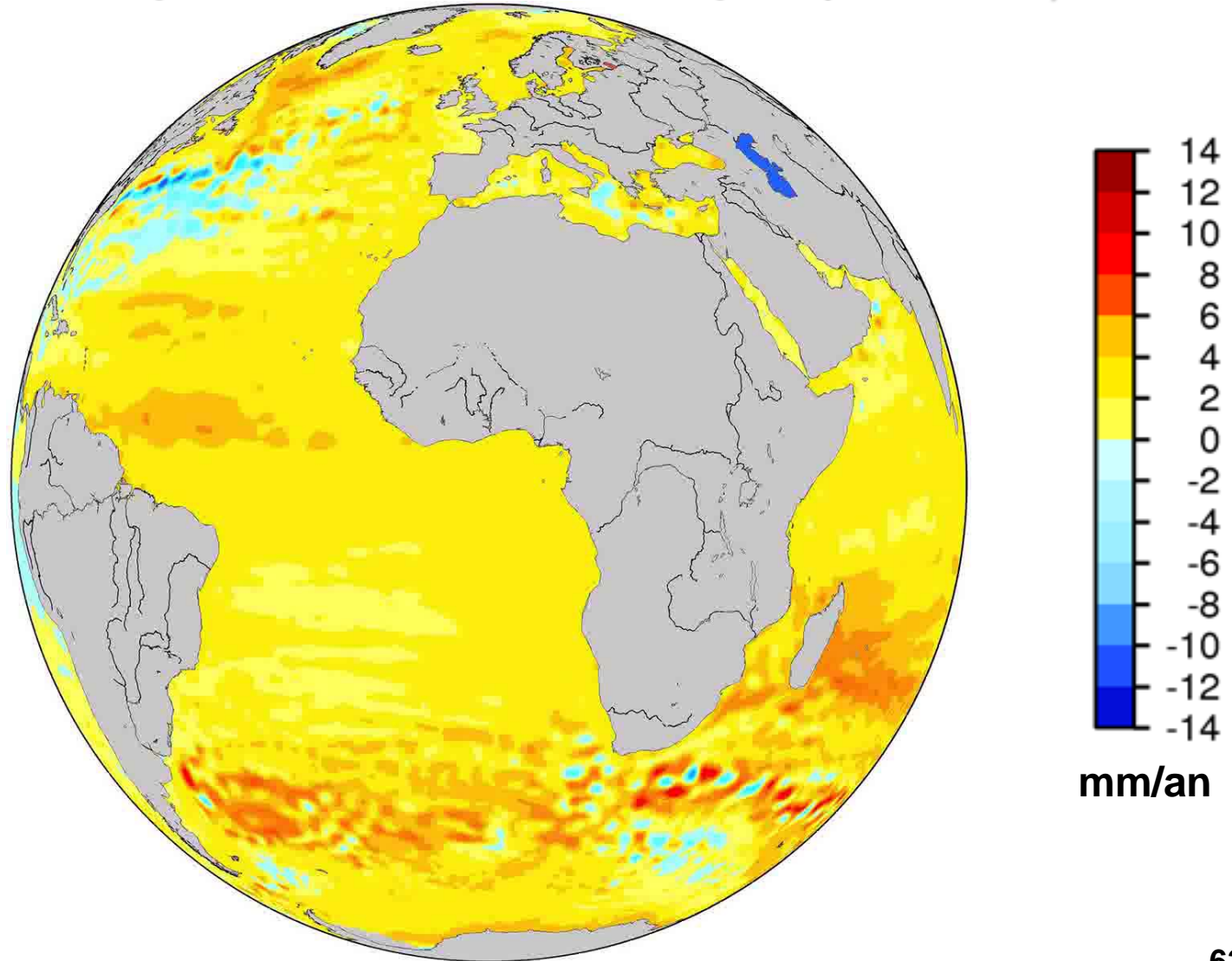


La mer ne monte pas de manière uniforme!

Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2012)



Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer observées par les satellites altimétriques (1993-2012)



Prochain cours (leçon n°4)

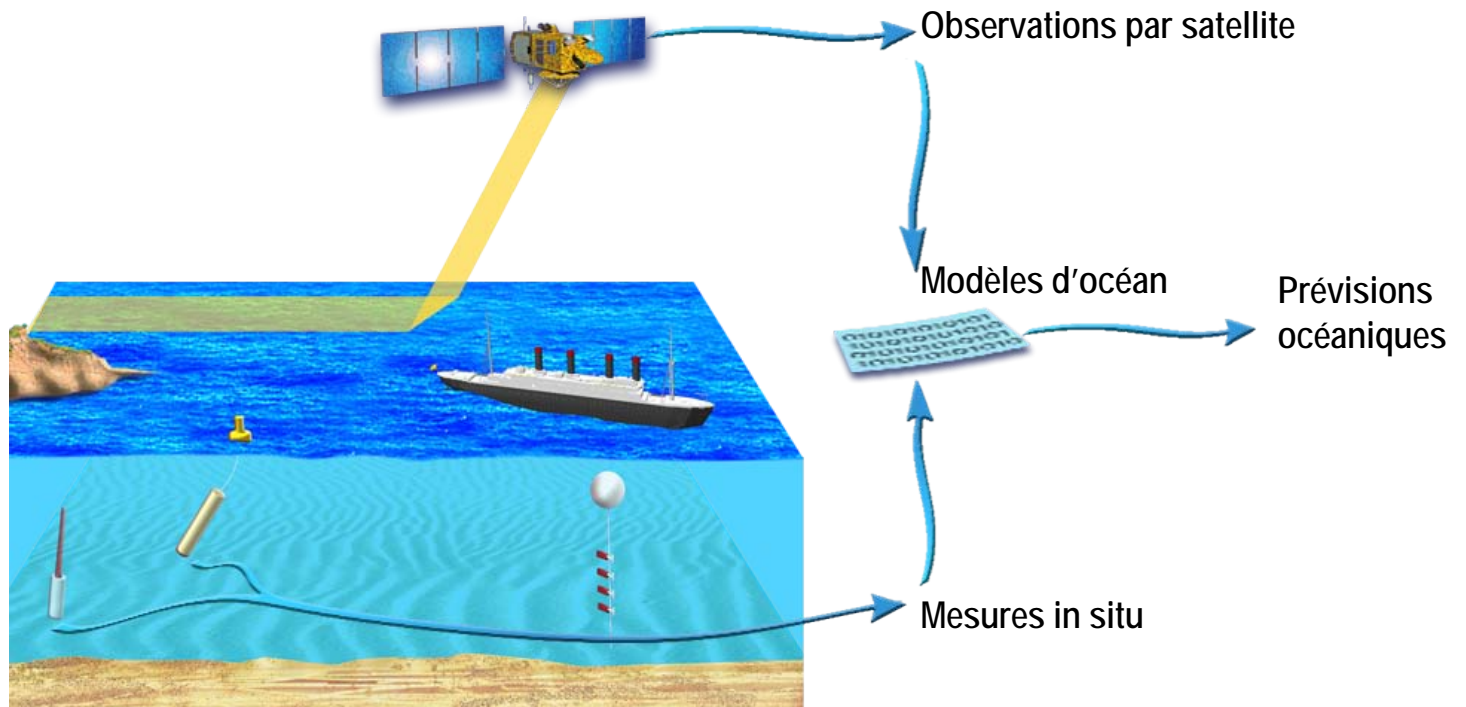
→ causes de la hausse actuelle du niveau de la mer (échelles globale et régionale) et changement climatique



Et dans un instant:

Et pour tout savoir sur l'Océanographie 'Opérationnelle'...

→ Conférence de **Pierre Bahurel**, Directeur de « Mercator-océan »





Merci de votre attention

Hauteur de la mer au dessus de l'ellipsoïde : H

$$H = h_{\text{sat}} - [h_{\text{s}} + h_{\text{i}} + h_{\text{iono}} + h_{\text{dry}} + h_{\text{wet}} + h_{\text{EM}} + h_{\text{otide}} + h_{\text{stide}} + h_{\text{ol}} + h_{\text{ptide}} + h_{\text{baro}}] + \square$$

- h_{sat} : Altitude du satellite au dessus de l'ellipsoïde (composante radiale d'orbite)
- h_{s} : instantaneous distance between the altimeter antenna and ocean surface
- h_{i} : *instrumental corrections*
- h_{iono} : ionospheric correction
- h_{dry} : dry tropospheric correction
- h_{wet} : *wet tropospheric correction*
- h_{EM} : EM-bias correction
- h_{otide} : **ocean tide correction**
- h_{stide} : solid Earth tide correction
- h_{ol} : ocean loading correction
- h_{ptide} : pole tide correction
- h_{baro} : inverted barometer correction
- ϵ : random and systematic remaining errors

Equilibre géostrophique

→ Equilibre entre le gradient horizontal de pression p s'exerçant sur un volume élémentaire (air ou eau) et la force de Coriolis

→ La vitesse horizontale du courant (u,v) est proportionnelle à la pente de la surface de l'océan:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho f v; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = -\rho f u$$

avec

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = -\frac{\rho g \Delta z}{\Delta x}$$

→ ρ = densité; g = accélération de la gravité; f = paramètre de Coriolis ($= 2\Omega \sin\varphi$)

Avec l'hypothèse hydrostatique ($dp = -\rho g dz$), on a

$$V(z) = g/\rho f \int \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + V_0$$

V_0 = vitesse de référence (surface)

→ Si on connaît la distribution verticale en densité et V_0 , on peut déterminer $V(z)$