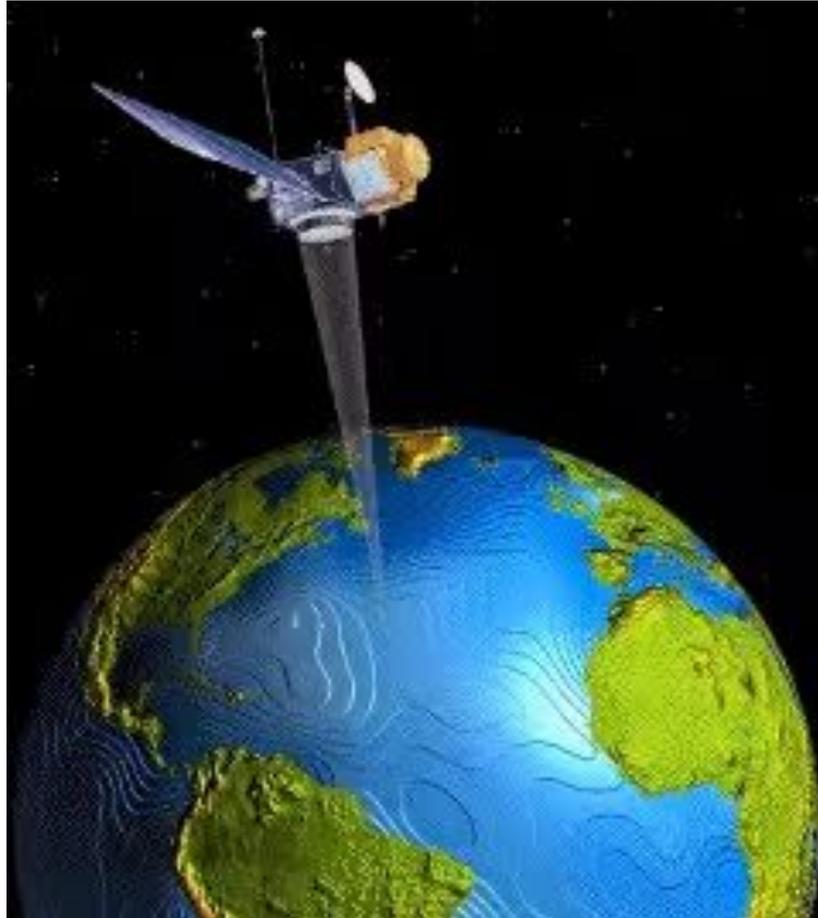


La mer monte, la terre aussi



Gérard MORIN
31 mai 2023

ALTIMETRIE



Altimétrie

- Référentiel
- Marégraphes
- Satellites
- Historiques

Objectif :

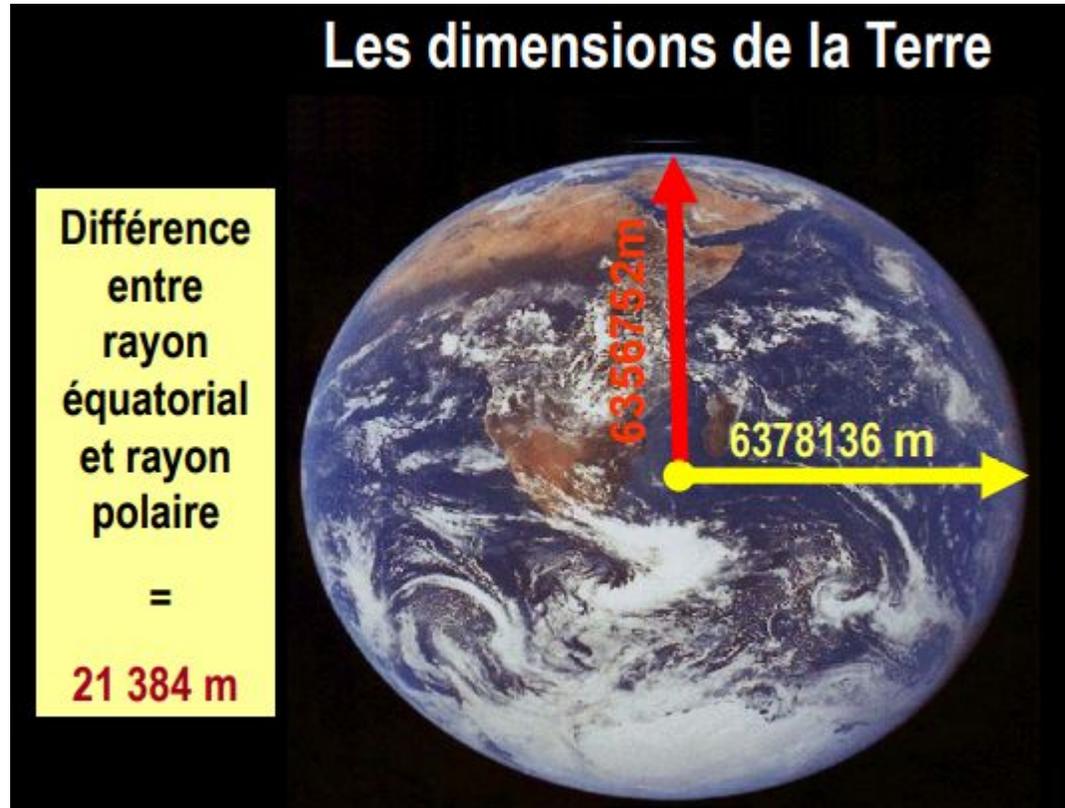
Mesurer le niveau de la mer «au repos» ? !

Perturbations

- Marées variables
- Pression atmosphérique
- Vents et tempêtes
- Houle, Tsunami, etc.
- Courants

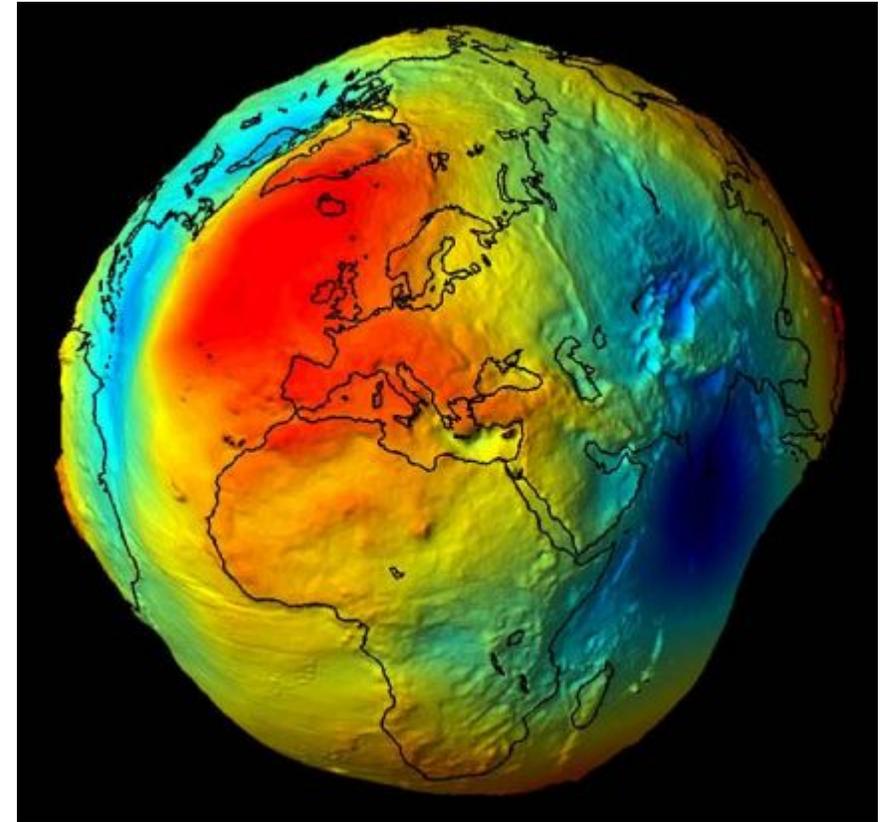
Ne changent pas le niveau
« au repos »

La planète TERRE – 2 référentiels



L'ellipsoïde : figure géométrique théorique

- Axe = axe de rotation de la terre
- Rayon équatorial > rayon polaire



Le géoïde: surface 'équipotentielle' du champ de gravité
→ coïncide avec le niveau moyen des mers au repos
→ visualise les variations géographique de la gravité

Altimétrie / marégraphes



Marégraphe du Conquet

Réseau mondial de marégraphes



Mesure relative Mer / terre

Mesures côtières

Prise en compte des marées,
pression atmosphérique,...?
?

Avantage : relevés anciens

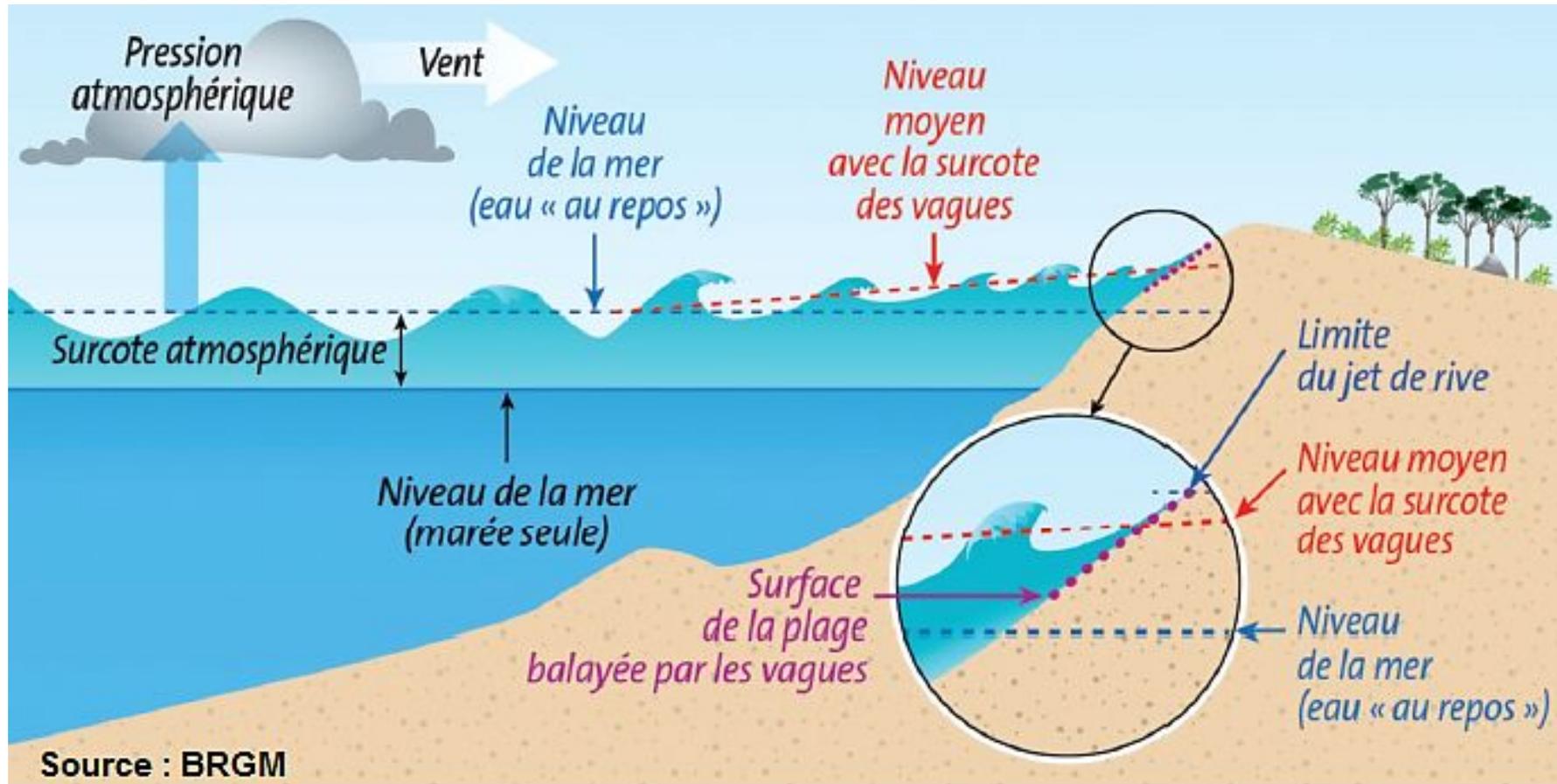
Exemple « LA ROCHELLE » : Evolution technique

1715 à La Rochelle - 1885 à La Palice

1997 : marégraphe numérique –capteur ultrason

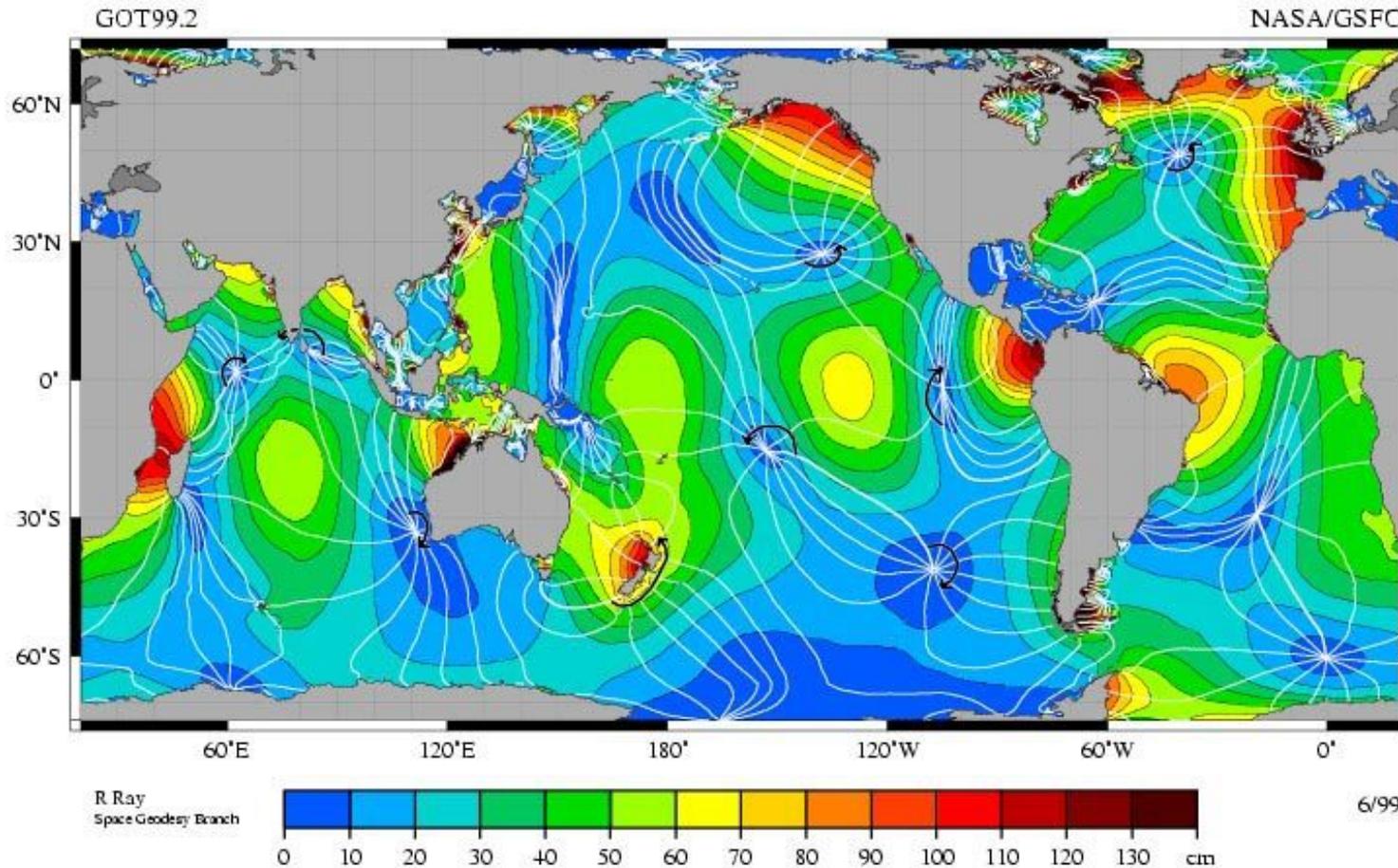
2001 : Capteur radar avec surveillance GPS des mouvements verticaux
du marégraphe

Altimétrie - précision ?



Facteurs : marées variables, pression atmosphérique, vents/tempêtes , houle
Algorithmes pour calculer le « niveau au repos » ? – Précision ?

Altimétrie – marées - points amphidromiques



Exemple des marées :

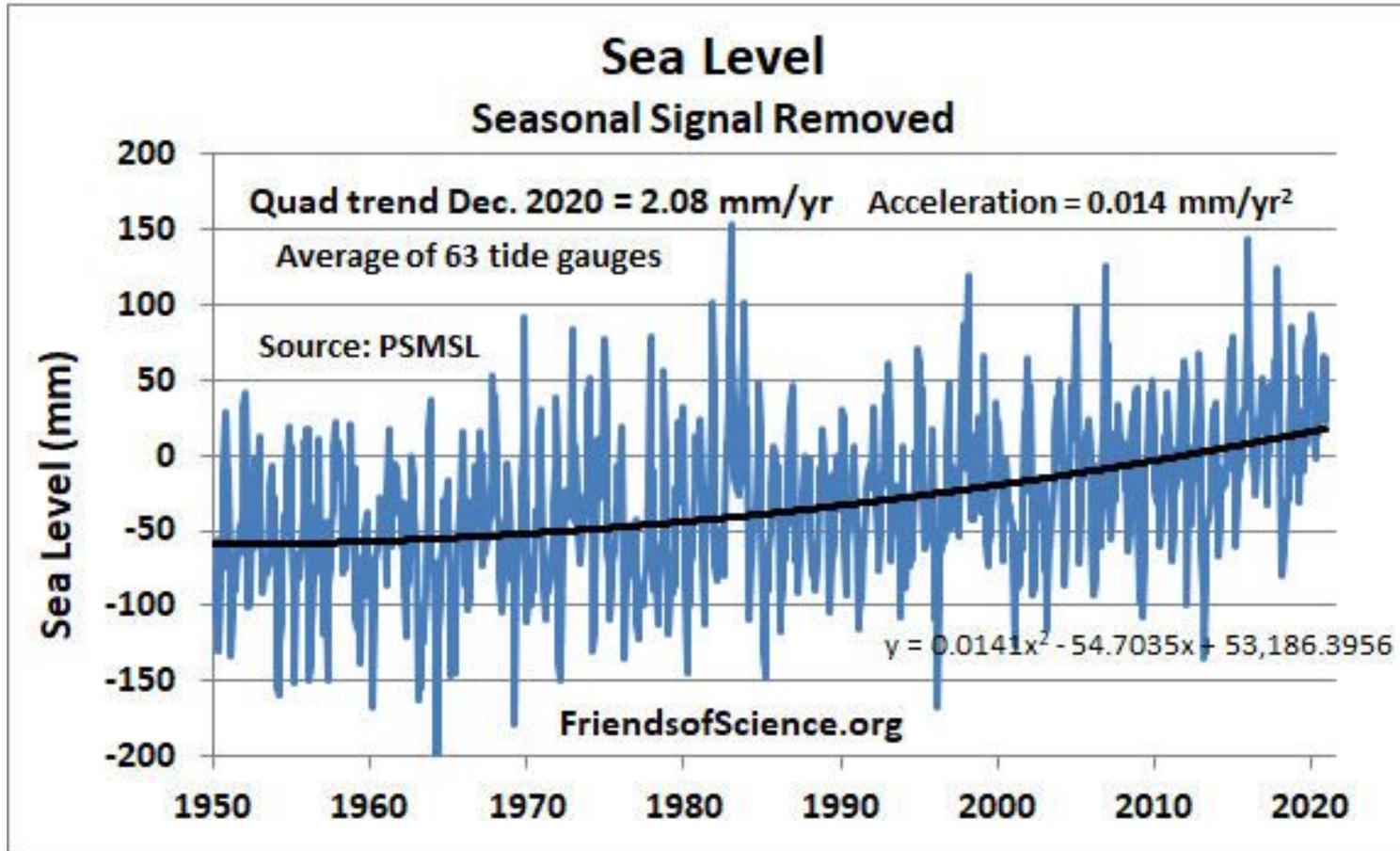
- Baie du Mont Saint Michel : jusqu'à 15 m
- La Rochelle : 6 m
- Tahiti : 0 m

Point amphidromique :

- Point sans marée
- La mer tourne autour de ces points

Eustasie rotationnelle ?

La mer monte - marégraphes



Trois techniques de mesure sur la période (évolution de l'étalonnage et de la précision)

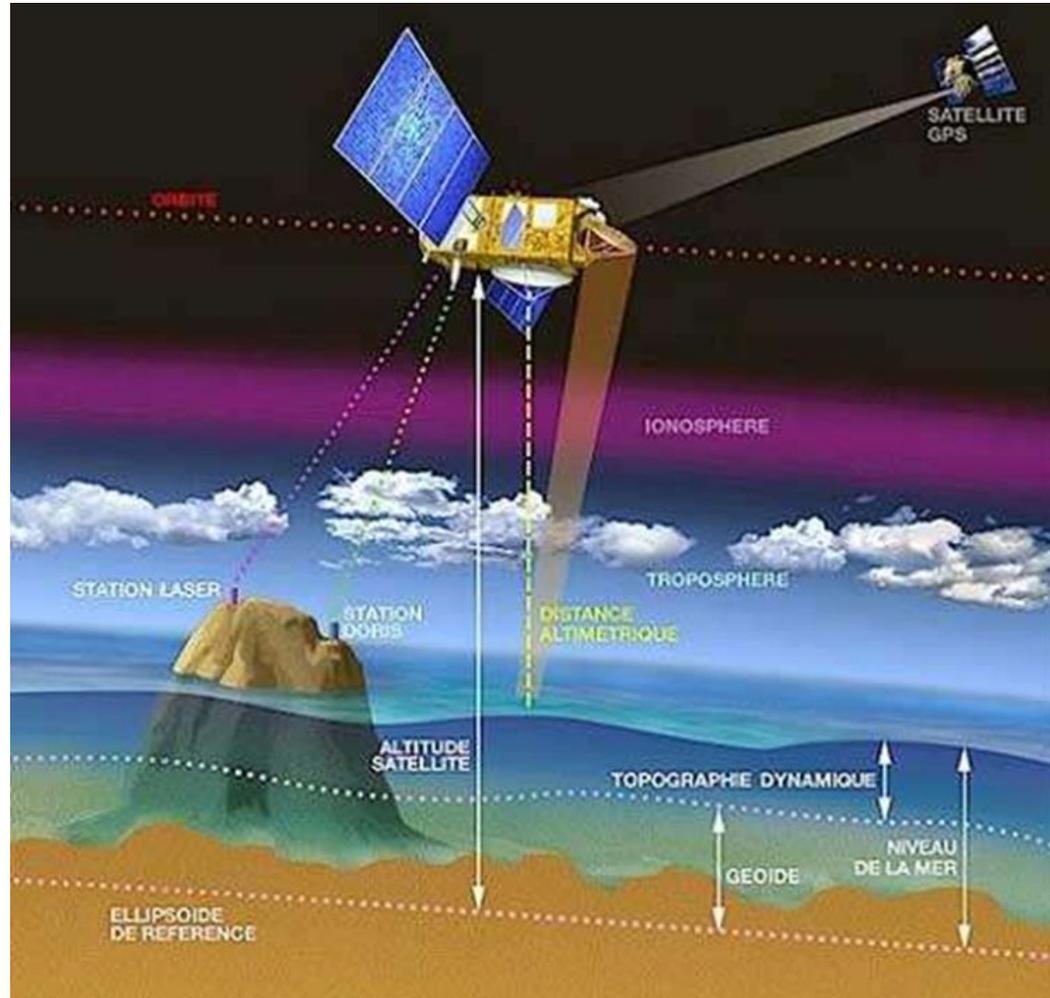
Grande dispersion des mesures selon l'année : de -200 à + 150 mm

Dispersion des mesures entre les 63 marégraphes ?

Fausse précision du résultat mis en exergue (+ 2 mm/an)

Marégraphes + 2,08 mm par an soit environ 20 cm par siècle

Altimétrie / satellites

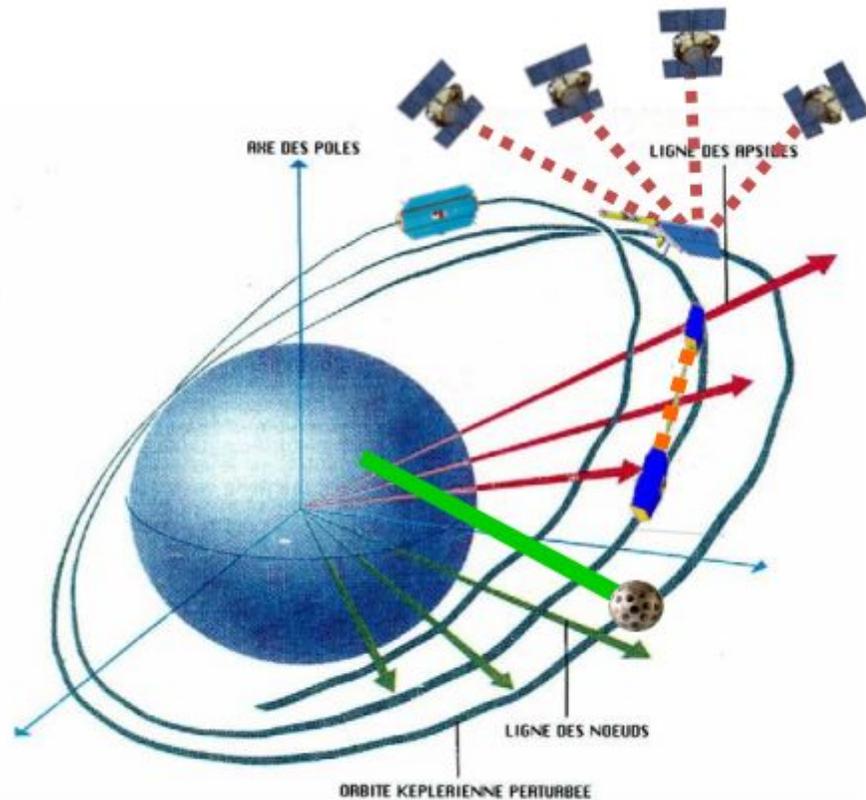


Mesure des altitudes des terres et des océans

Systèmes de mesure extrêmement complexes en l'absence de tout référentiel concret et stable.

Altimétrie / satellites

Déformation de l'orbite sous l'effet des forces agissant sur le satellite



Forces :

- Champ de gravité terrestre
- Attraction gravitationnelle du soleil, de la lune et des autres planètes
- Marées océaniques et terrestres
- Frottement de l'atmosphère
- Etc.

Altimétrie - Précision



Le satellite repasse au même endroit tous les 10 jours.

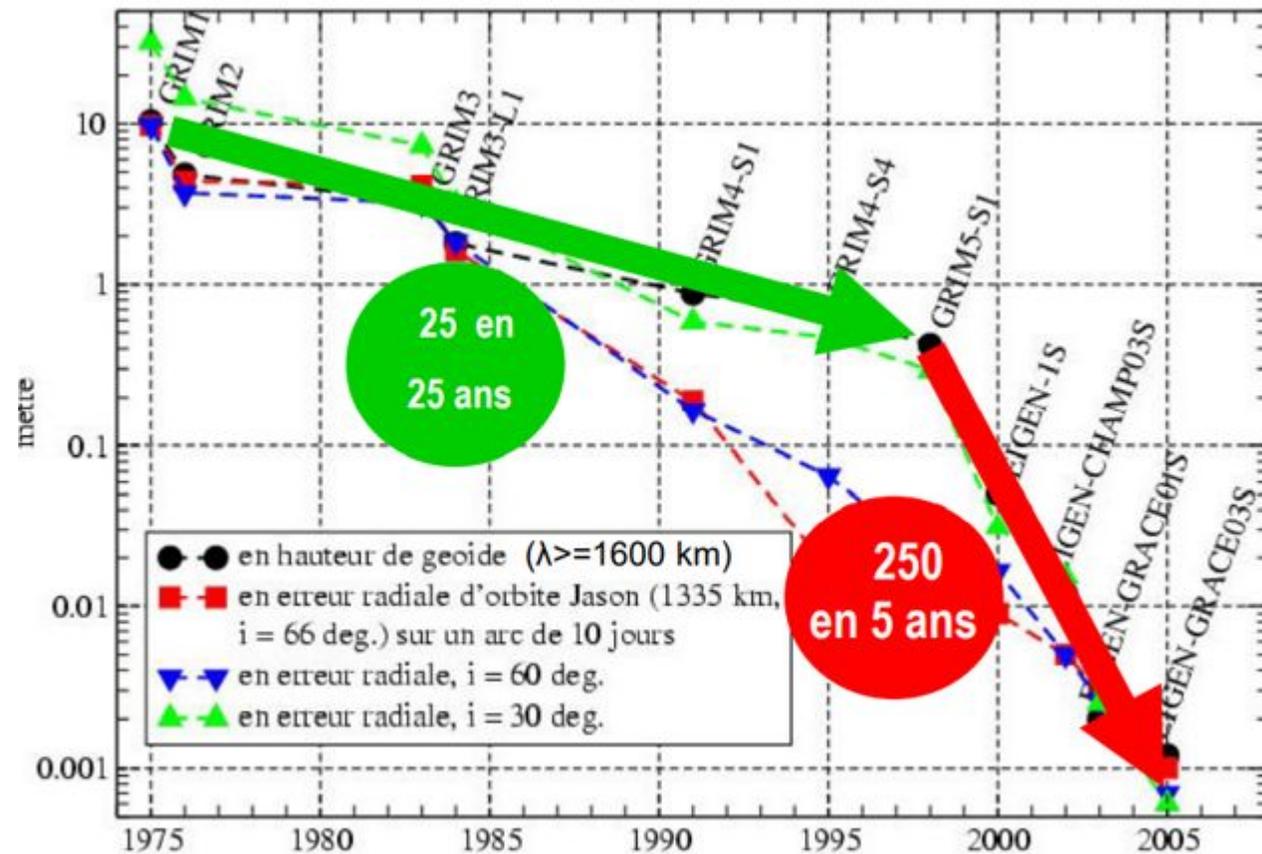
Mesures : entre 66°N et 66°S

Ecart de 315 km entre 2 passages à l'équateur (112 mn)

Le résultat est un « échantillonnage » et non une mesure complète à un instant donné.

Altimétrie - Précision

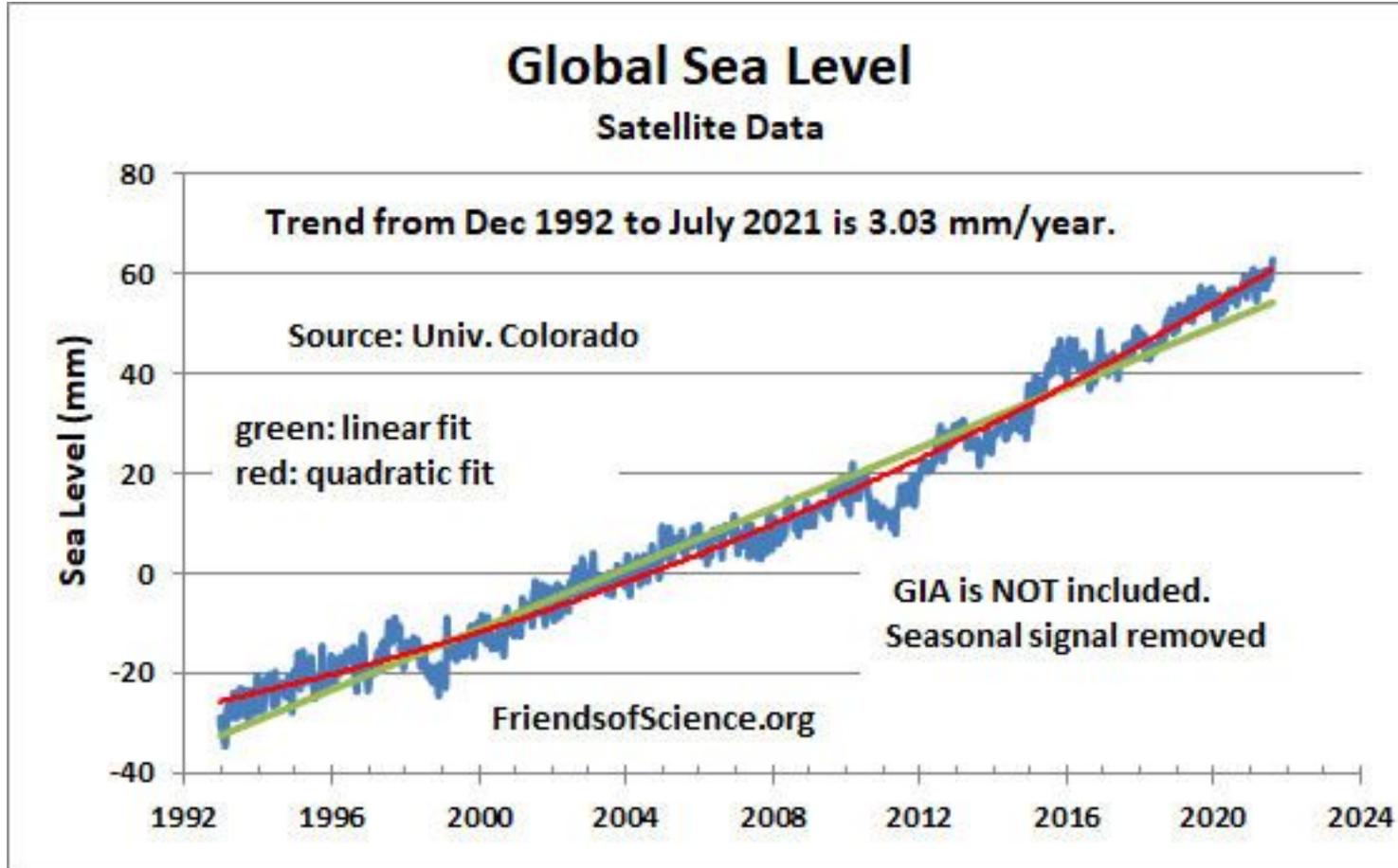
Evolution de la précision sur la hauteur de le Géoïde (en m)
(Modèles GRIM et EIGEN versus modèles AIGEN – GL04S)



Autres incertitudes

- Hauteur du satellite
- Perturbation des transmissions (dont vapeur d'eau)
- La mer n'est jamais au repos
- Algorithmes de de traitement des données brutes

La mer monte / satellites



Période couverte : 30 ans

Marge d'erreur très variable:

1992 : 0,1 mètre

2000 : 0,01 mètre

2005 : 0,001 mètre ?

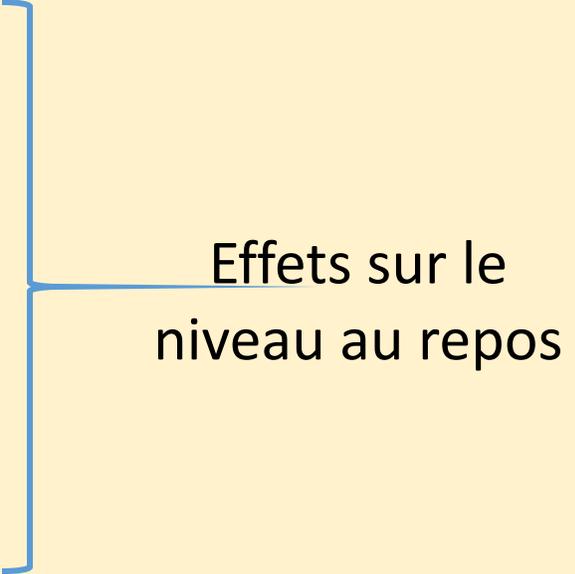
Dispersion géographique ?

Satellites – 3,03 mm par an soit environ 30 cm par siècle

Altimétrie - Conclusion

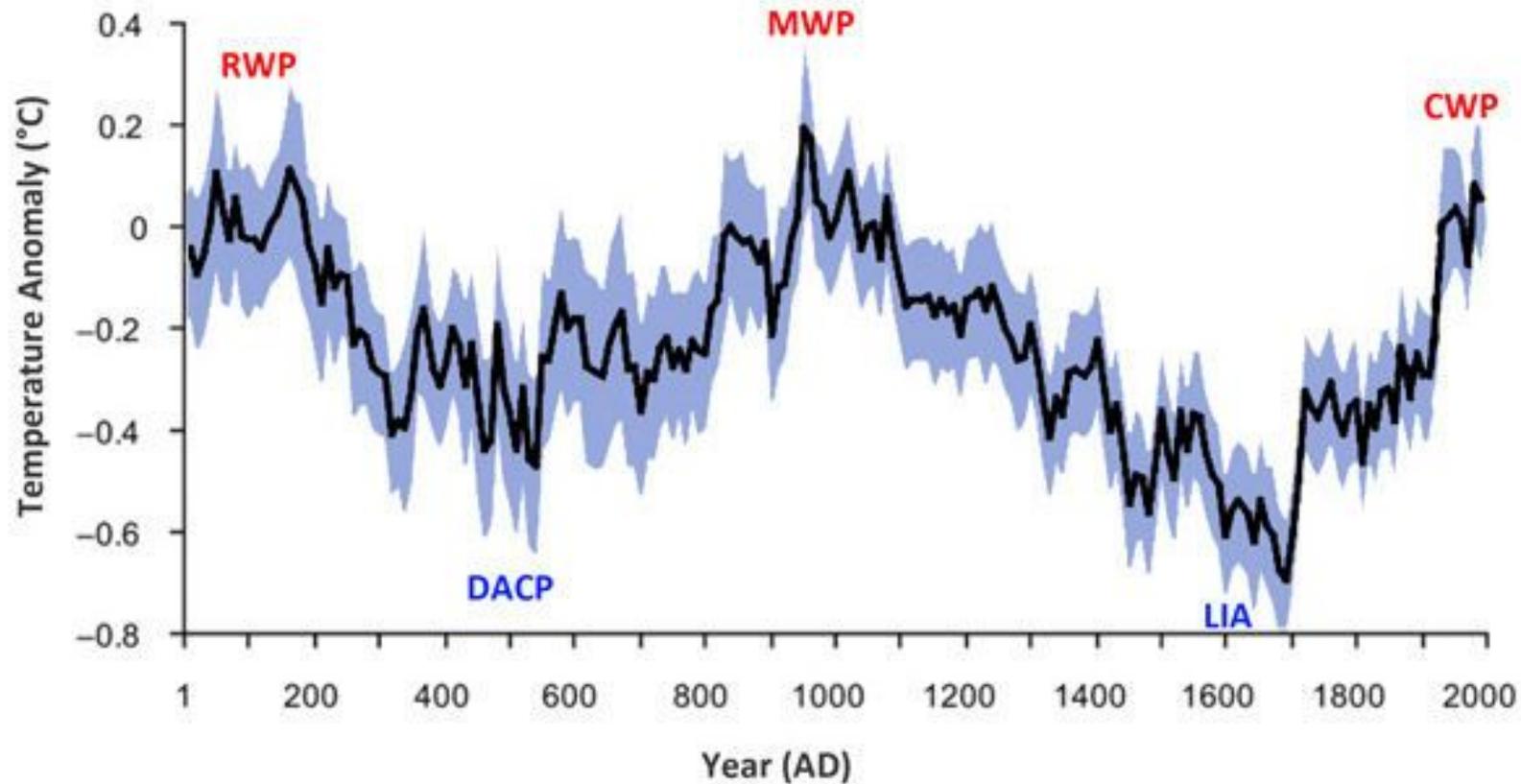
- Les mesures de l'altitude des terres et des océans s'améliorent progressivement
- Les historiques actuels mélangent des mesures dont la précision est très variable
- Les moyennes globales cachent la diversité géographique des phénomènes
- Il faudra encore quelques dizaines d'années pour que les historiques satellitaires soient significatifs et instructifs
- L'écart entre les deux systèmes de mesure reste controversé ?

La montée des océans

- Augmentation de la température / Dilatation ?
 - Dimension des bassins océaniques ?
 - Fonte des calottes glaciaires ?
 - Fonte des glaciers terrestres ?
 - Submersions temporaires (tempêtes, cyclones, tsunامي, etc.)
- Effets sur le niveau au repos
- 

Evolution de la température terrestre (hémisphère nord)

Extra-Tropical Northern Hemisphere (30-90°N) Decadal Mean Temperature
Adapted from Ljungqvist, 2010



RWP = Période chaude romaine AD 1-300

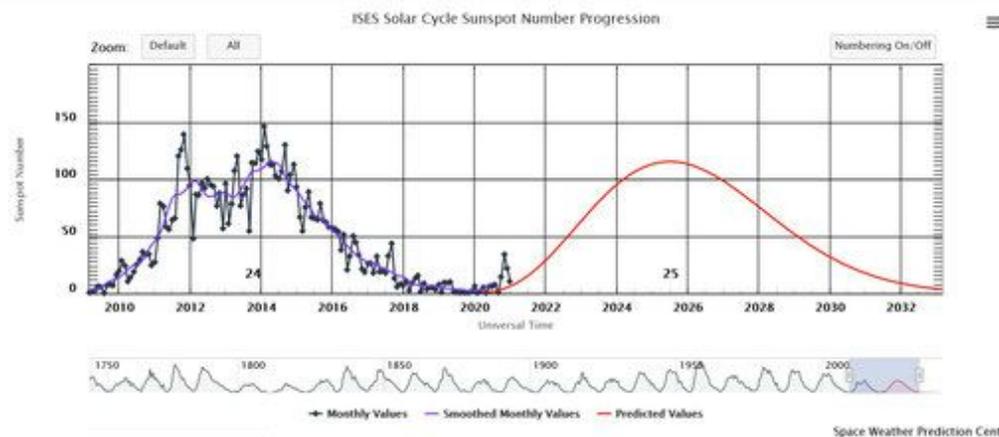
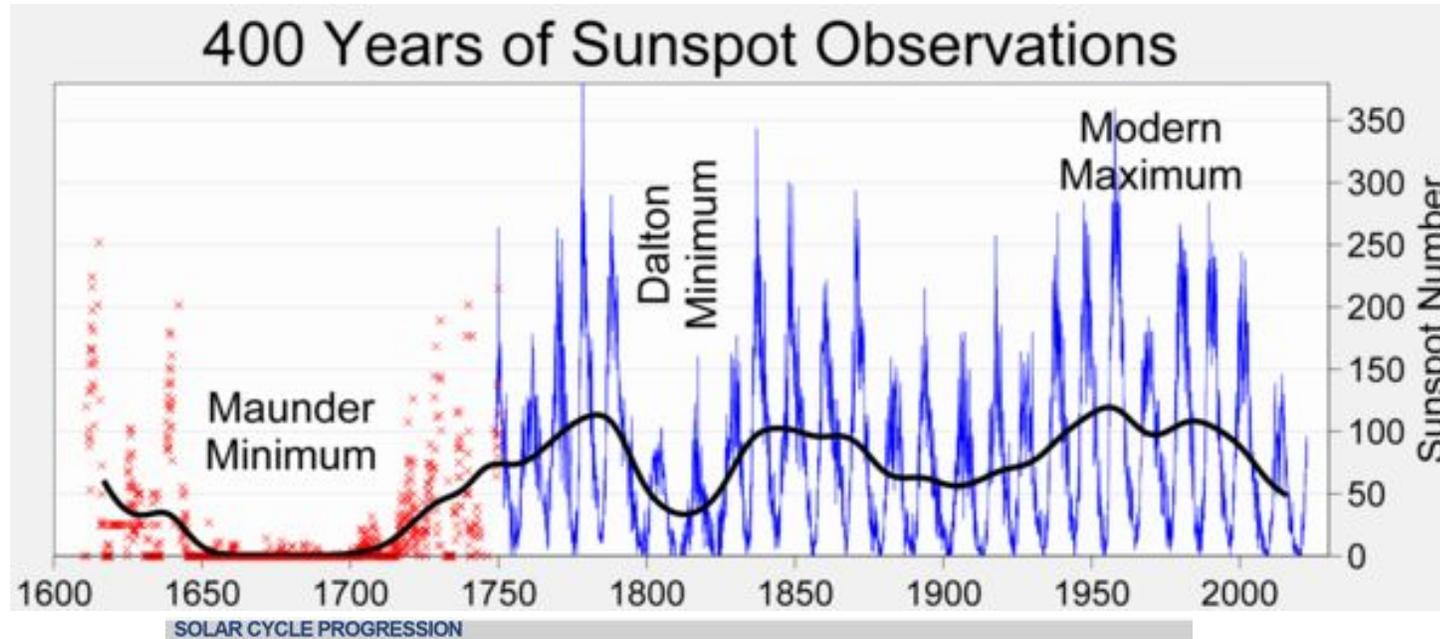
DACP = Période froide de l'âge noir 300-900

MWP = Période chaude médiévale 800-1300

LIA = Petit âge glaciaire 1300-1900

CWP = Période chaude actuelle de 1900 à aujourd'hui

Activité solaire



Activité solaire en proportion du nombre de taches

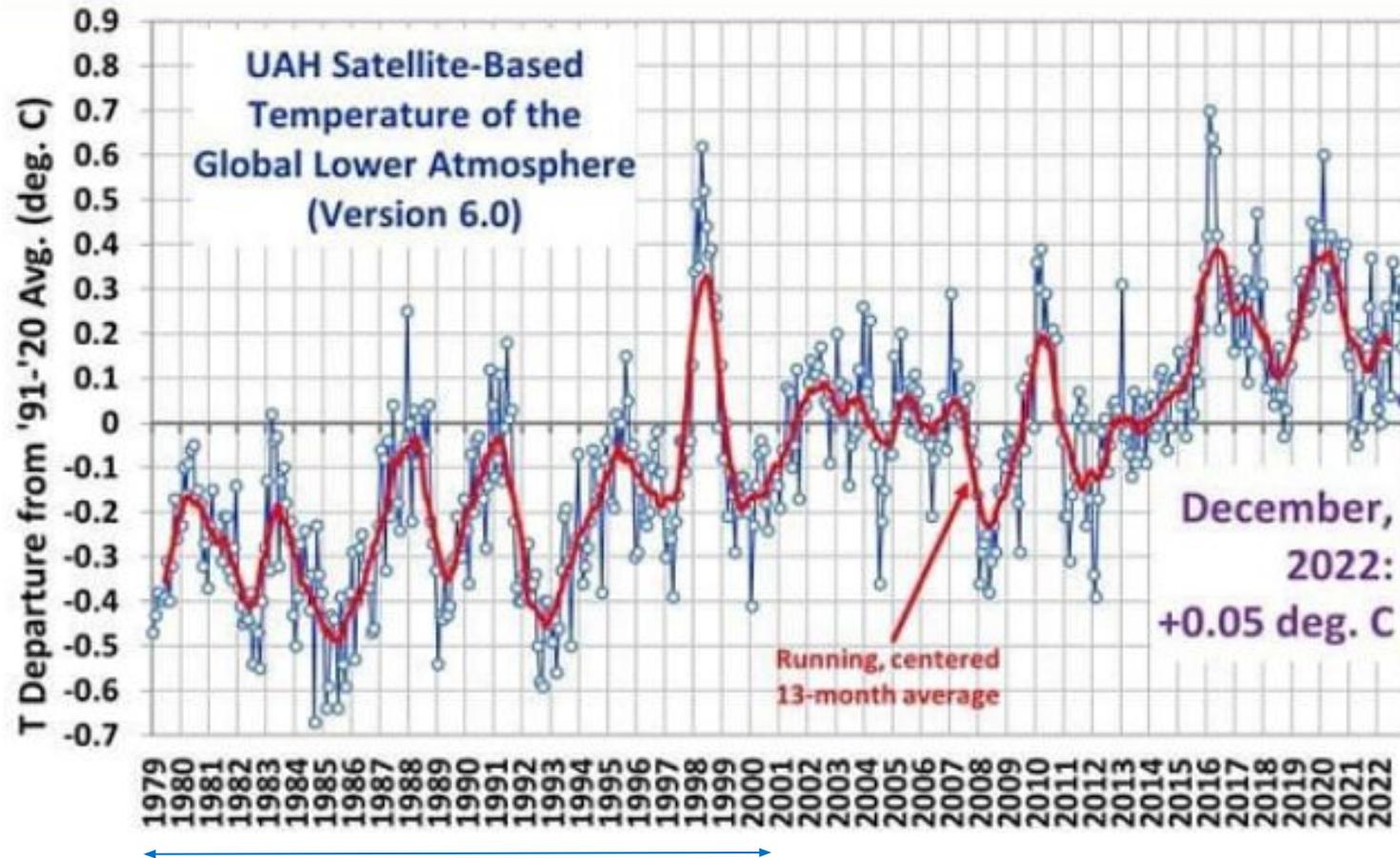
Le cycle 24 a commencé en 2008 et s'est terminé fin 2019.

Le **cycle solaire 25** ... a démarré en décembre 2019 et devrait se poursuivre jusqu'en 2030

Selon l'accord général, il sera plus faible que la moyenne, c'est-à-dire plus faible que pendant le « maximum moderne »

La masse calorifique des océans fait que l'effet est décalé de 10 à 15 ans (d'après Wikipédia)

Augmentation de la température de surface (atmosphère)



UAH – Organisme de référence pour le GIEC

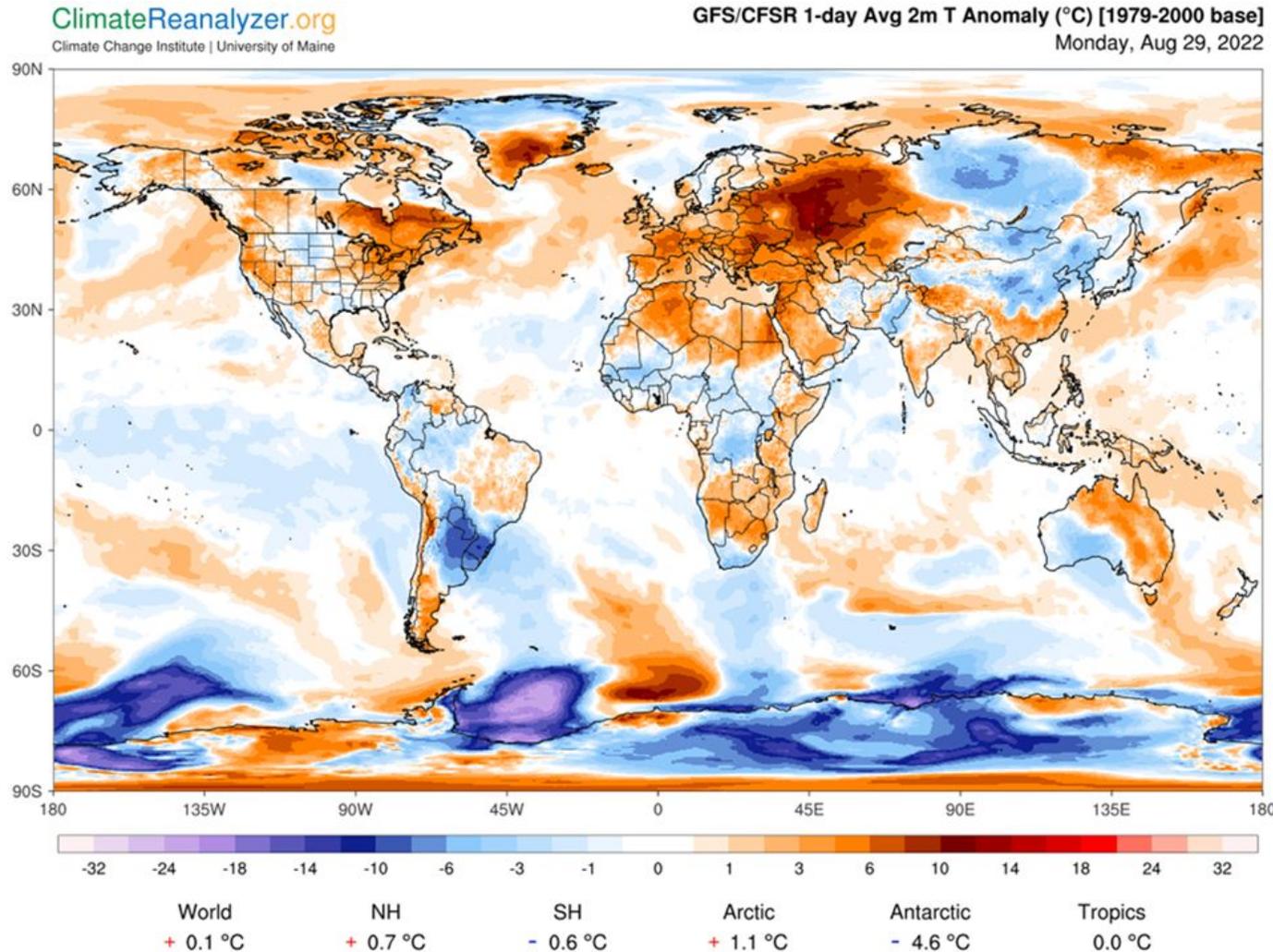
Année 2016 : année record

Baisse progressive de 2016 à 2022 :

Décembre 2022 à la moyenne de la période

←→ 1979 à 2000 : période de référence pour la vue suivante : la canicule de 2022 ?

Augmentation de la température de surface



Référence : période 1979 – 2000

Relevé du 29 aout 2022

Global / au niveau de la référence :
+0,1°

Ecart de 1,3° entre le nord et le sud

Canicule sur l'Europe - Froid sur
l'Asie, l'Afrique équatoriale et en
Argentine..

Grand froid sur l'Antarctique : aucun
risque de fonte !

Sur les océans, la température est
globalement au niveau de la période
de référence.

Explication de la répartition ???

Volcans sous-marins

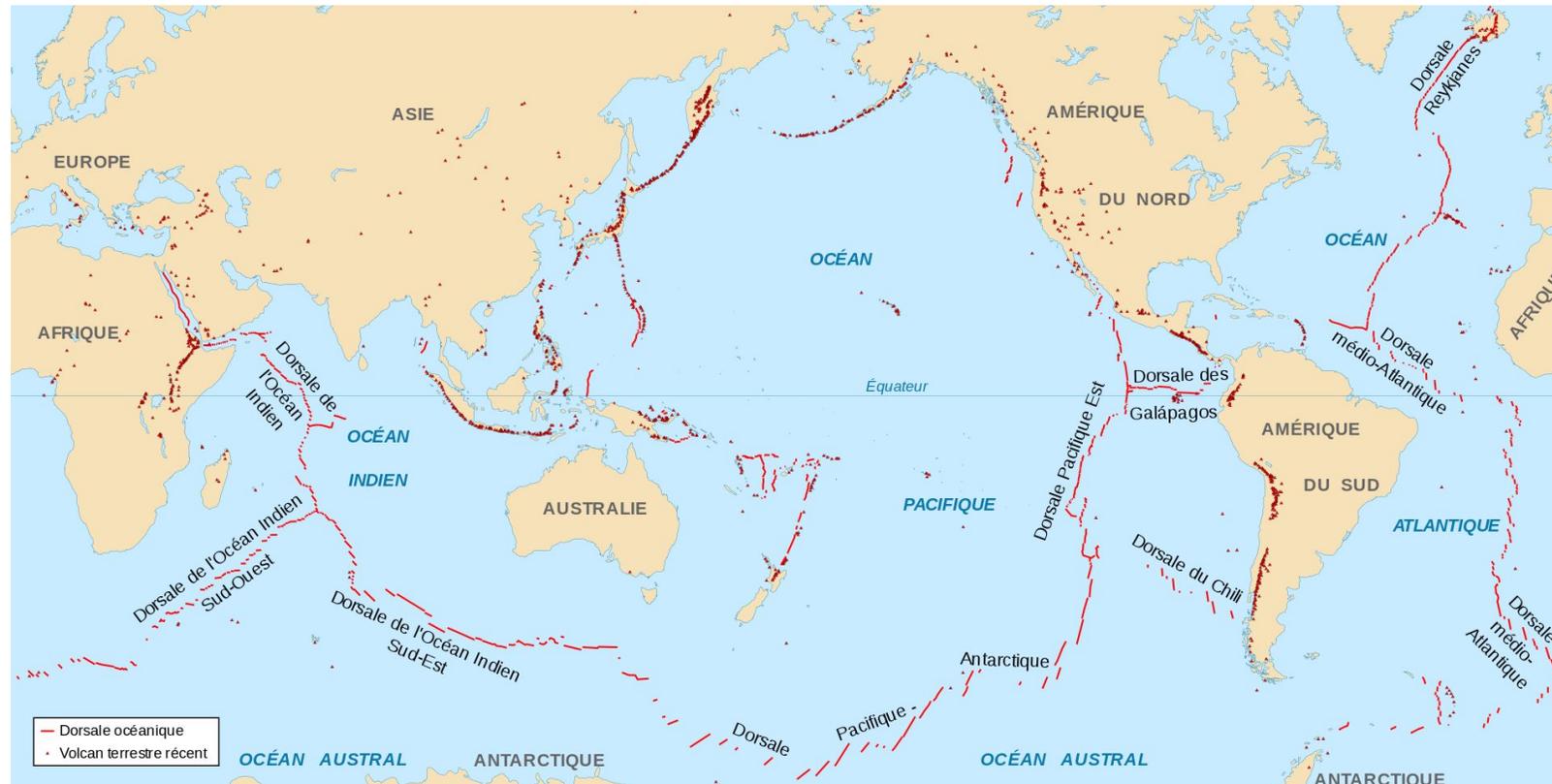
1500 volcans
terrestres

75000 volcans
sous-marins

Des milliers sont
actifs

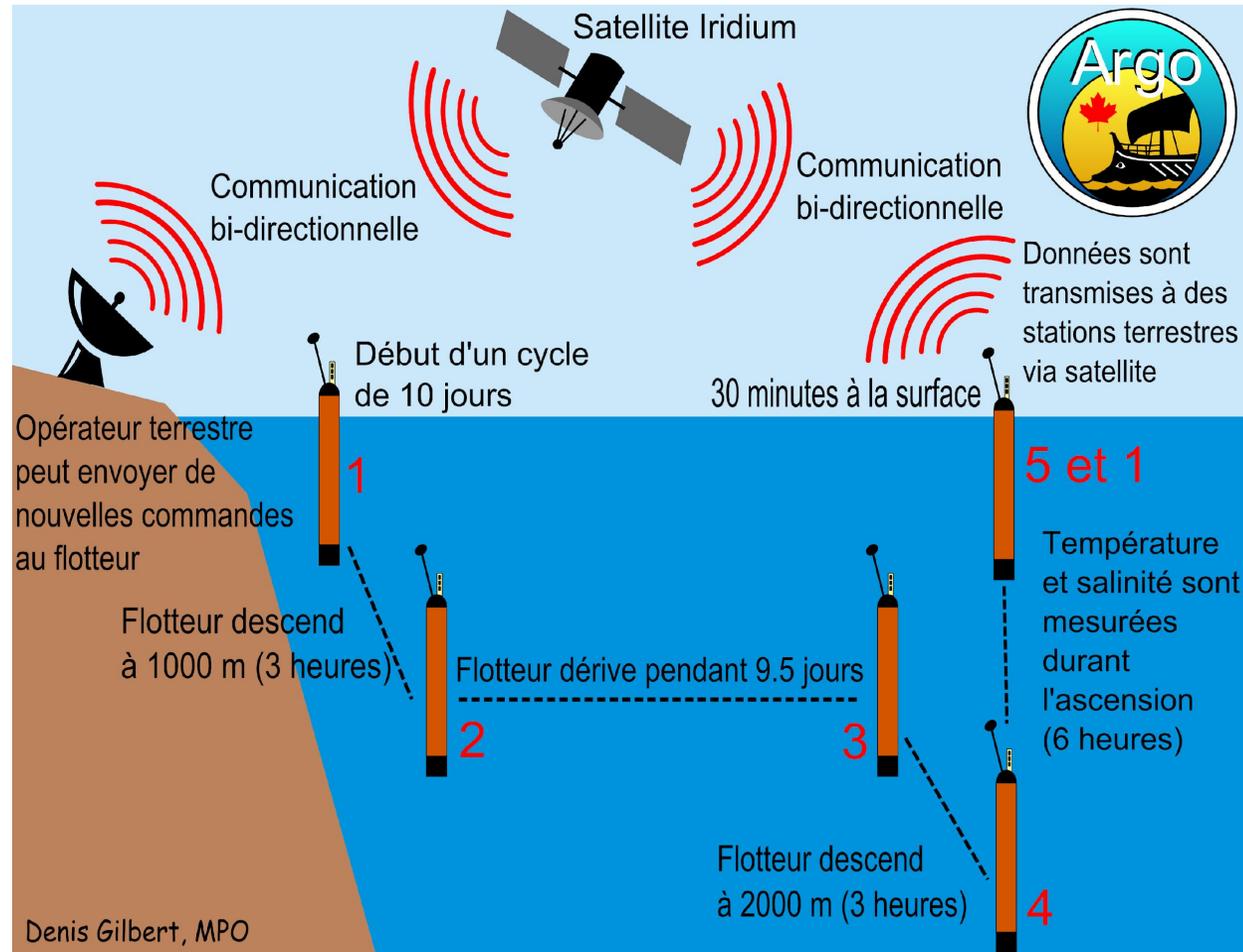
Hauteur des volcans
: jusqu'à 1000
mètres au dessus du
plancher océanique

Création de
nouvelles îles



Les eaux chaudes remontent à la surface □ vers les bouées ARGO !

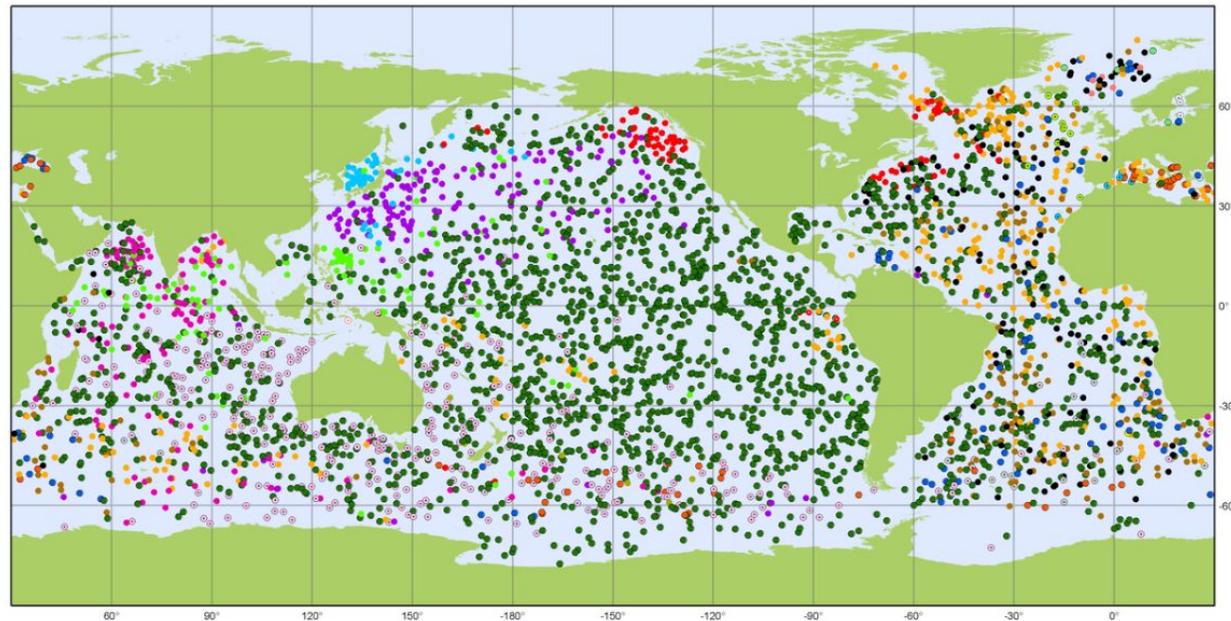
Mesure de la température : bouées ARGO



Résultats complexes :

- **Partie supérieure (0 à 1900 m) , de 2004 à 2021 : + 0,07 °C (soit 0,44° par siècle)**
- Réchauffement maximal : 0,2°C , les 100 premiers mètres, à l'équateur
- Océans du nord (55-65°N) : refroidissement marqué jusqu'à 1400 mètres
- Océans du sud (55-65°S) : léger réchauffement mais principalement près de la surface

Mesure de la température – Bouées ARGO

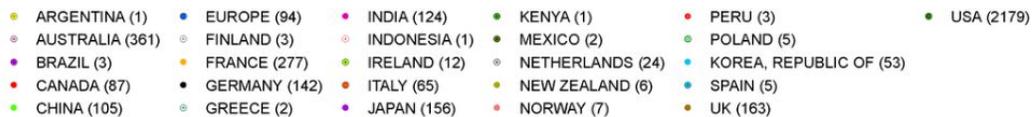


Argo

National contributions - 3881 Operational Floats

February 2018

Latest location of operational floats (data distributed within the last 30 days)



Generated by www.jcommops.org, 02/03/2018

La répartition des bouées est aléatoire, elles suivent les courants.

Cet historique sur 17 ans ne légitime aucunement le calcul sur un siècle :

Dilatation : + 0,44° par siècle sur une profondeur de 1900 mètres ferait une hausse de 21,7cm si les cotes étaient verticales.

En pratique nous ignorons la hausse réelle et l'étalement résultant de cette dilatation.

Les températures côtières ne sont pas mesurées

On ignore la température globale des océans (du fond à la surface) !

La mer se réchauffe - Conséquences

Conséquences du réchauffement des océans :

- Contribution au réchauffement de l'atmosphère par échange thermique

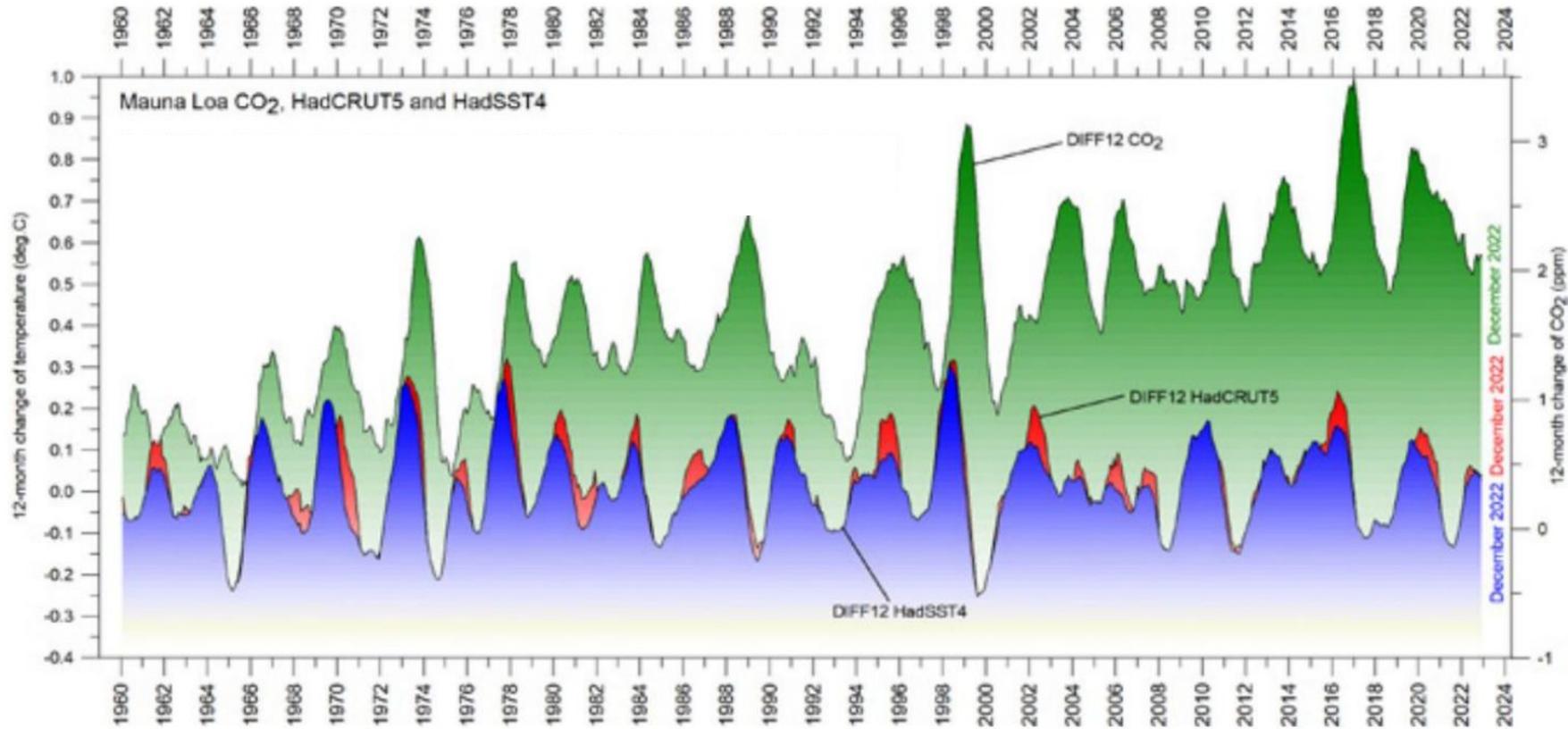
- Le cycle de l'eau (Nature Géoscience) :

• Océans :	1 335 000	milliers de km ³	
• Évaporation annuelle	420		(0,03%)
• Précipitations / Océans	380		
• Précipitations / Terres	40		
• Retour à la mer	50		

vapeur d'eau : 1 à 5 % de l'atmosphère

- Quid du CO₂ ?
 - 0,04 % de l'atmosphère dont 0,002 % anthropique

La mer se réchauffe - Conséquences



Corrélation des concentrations de dioxyde de carbone et des relevés de température
(Différence entre la moyenne des 12 derniers mois et la moyenne des 12 mois précédents)

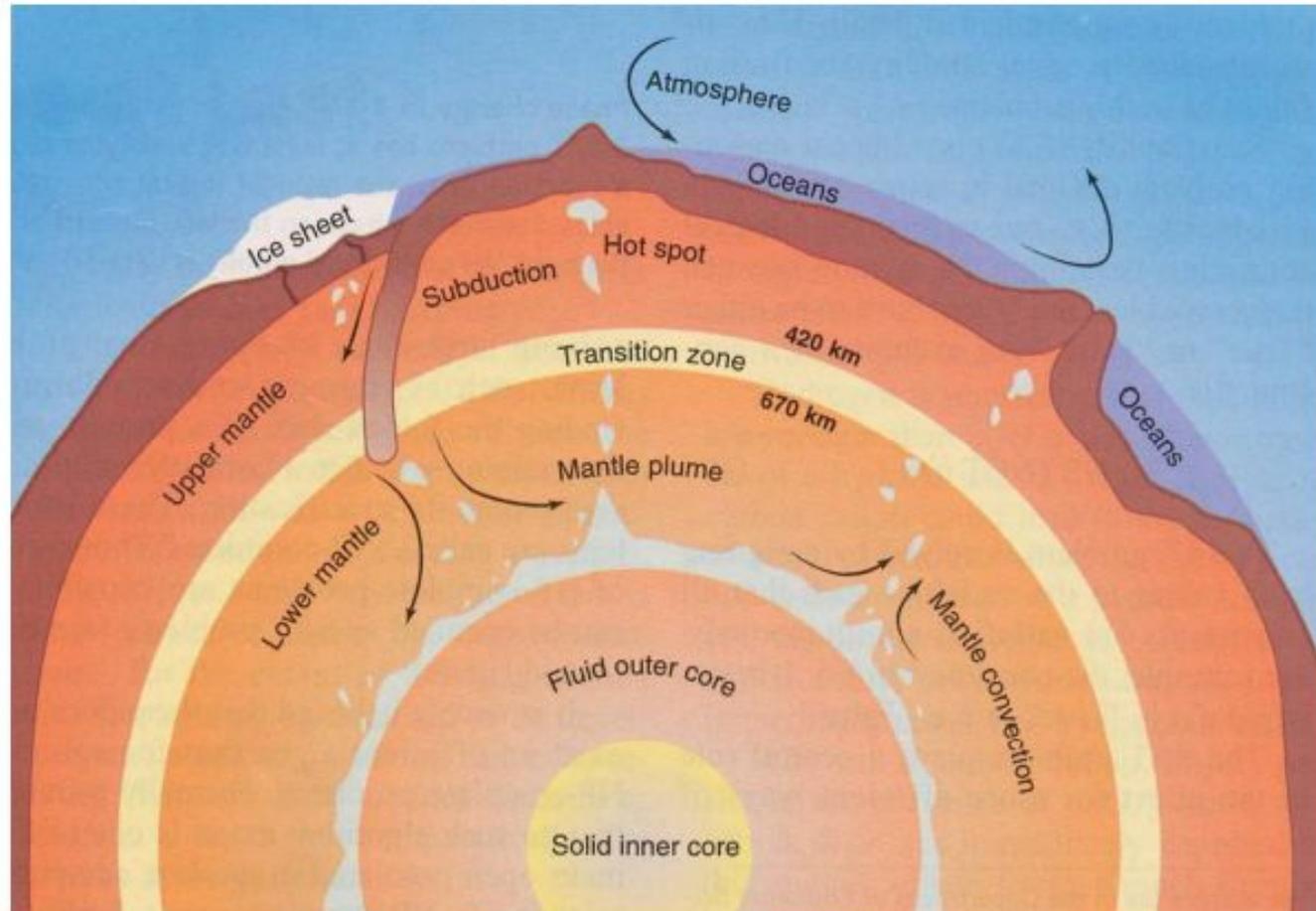
Changement annuel : de la température globale de la surface de la mer (HadSST4 ; bleu)

de la température globale de l'air de surface (mer et terre) (HadCRUT5 ; rouge).

de la concentration atmosphérique mondiale de CO₂ (Mauna Loa ; vert),

La mer monte – les bassins océaniques ?

La structure interne de la Terre



Les mouvements internes du globe provoquent des mouvements horizontaux et verticaux de la croûte terrestre.

Les bassins océaniques sont donc modifiés.

Aucun historique précis

Aucune prévision possible

Des évolutions brusques peuvent provoquer des tsunamis

Fonte des glaces terrestres ?

Répartition des glaces terrestres

- Antarctique 90 %
- Groenland 9 %
- Glaciers de montagne 1 %

(Pour mémoire : la fonte d'une banquise ne change pas le niveau de la mer.)

Selon PLANET TERRE – ENS de Lyon

« Pour l'instant la fonte des glaciers n'a qu'un rôle négligeable (ou du moins largement minoritaire). Les glaciers qui ont fondu notablement depuis un siècle ne sont que les glaciers de montagnes. »

Fonte des glaciers de montagne



Accumulation

Températures $<$ à 0°

Précipitations sous forme de neige

Deviens glace sous son propre poids

La glace s'écoule lentement.

Ablation

Températures $>$ à 0°

L'eau de fonte s'écoule et donne naissance à des torrents, des rivières, des fleuves, alimente des lacs et des nappes phréatiques

A ce jour, une majorité de glaciers régressent mais certains progressent.

Dans un même massif certains glaciers régressent et d'autres progressent.

Un long parcours attend l'eau de fonte avant d'arriver à la mer.

Pas d'évaluation précise de l'effet sur les océans mais à priori minime.

XYNTHIA – 28 février 2010 – Submersion

Submersion XYNTHIA - Conjonction d'évènements :

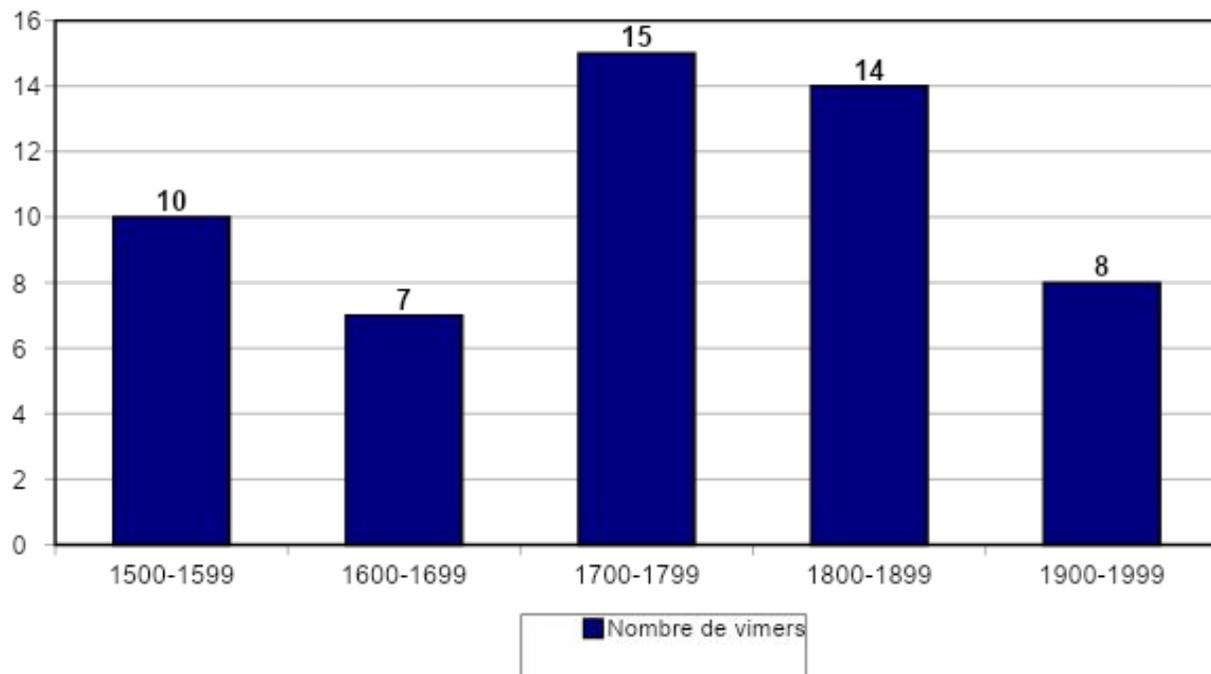
- Passage, d'est en ouest, d'une forte dépression,
- Vents de 170 km/h
- Un jour de grand coefficient de marée
- A l'heure de la marée haute

Surcote de 1,5 mètre

C'est une submersion momentanée – jusqu'à la marée basse suivante

De plus en plus de submersions ou « vimers » ?

Fréquence des submersions : Ile de Ré



Aucun siècle n'est épargné !

Les 18^{ème} et 19^{ème} ont été très critiques avec des vimers extrêmement violents.

La dernière partie du 20^{ème} siècle a été relativement calme.

Avant Xynthia, c'est en 1957 que le dernier vimer important a sévi.

Ce qui est exceptionnel, ce n'est pas Xynthia mais plus de 50 ans sans « grand vimer ».

La mer monte – Prévision ?

Variations de l'activité solaire

- En baisse sensible par rapport au « *maximum moderne* »
- Elles sont imprévisibles à moyen et long terme

Les activités volcaniques sous-marines ne sont ni mesurées, ni prévisibles

Les mesures des températures des océans sont récentes et limitées à 1900m (Bouées ARGO)

La variation des dimensions des bassins océaniques n'est pas évaluée.

Conclusion : Prévision impossible à 2100

La mer monte – Prévisions GIEC (RT)

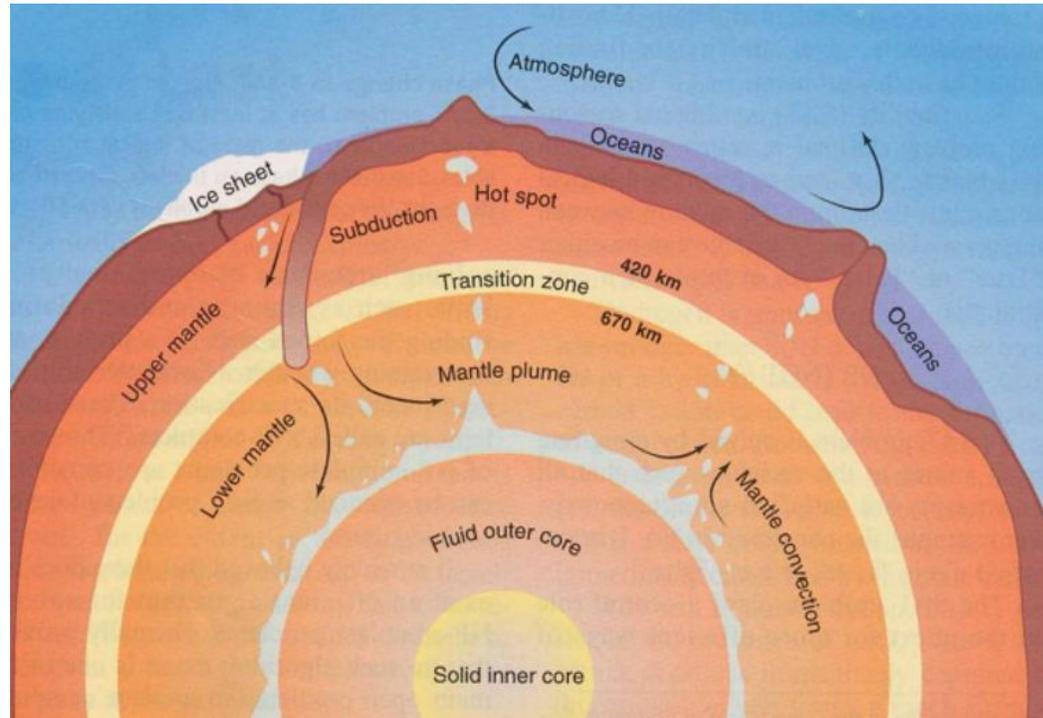
Que dit le GIEC ?

AR5/RT/RT6 « On accorde un faible degré de confiance aux projections des modèles semi-empiriques quant à l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe et la communauté scientifique n'est arrivée à aucun consensus en ce qui concerne leur fiabilité. »

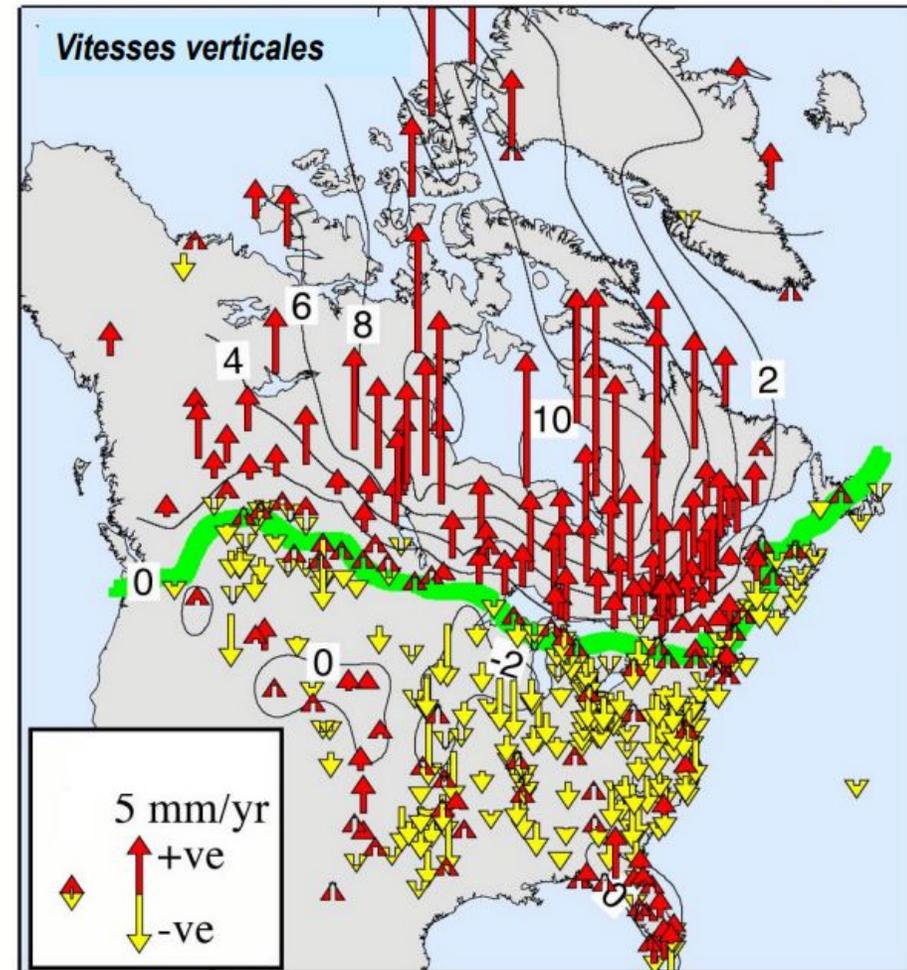
La terre monte - causes

- Mouvements verticaux des plaques terrestres
- Rebond glaciaire
- Apport d'alluvions

La terre monte – Amérique du Nord



Mesure par GPS du soulèvement de la croûte terrestre en Amérique du nord

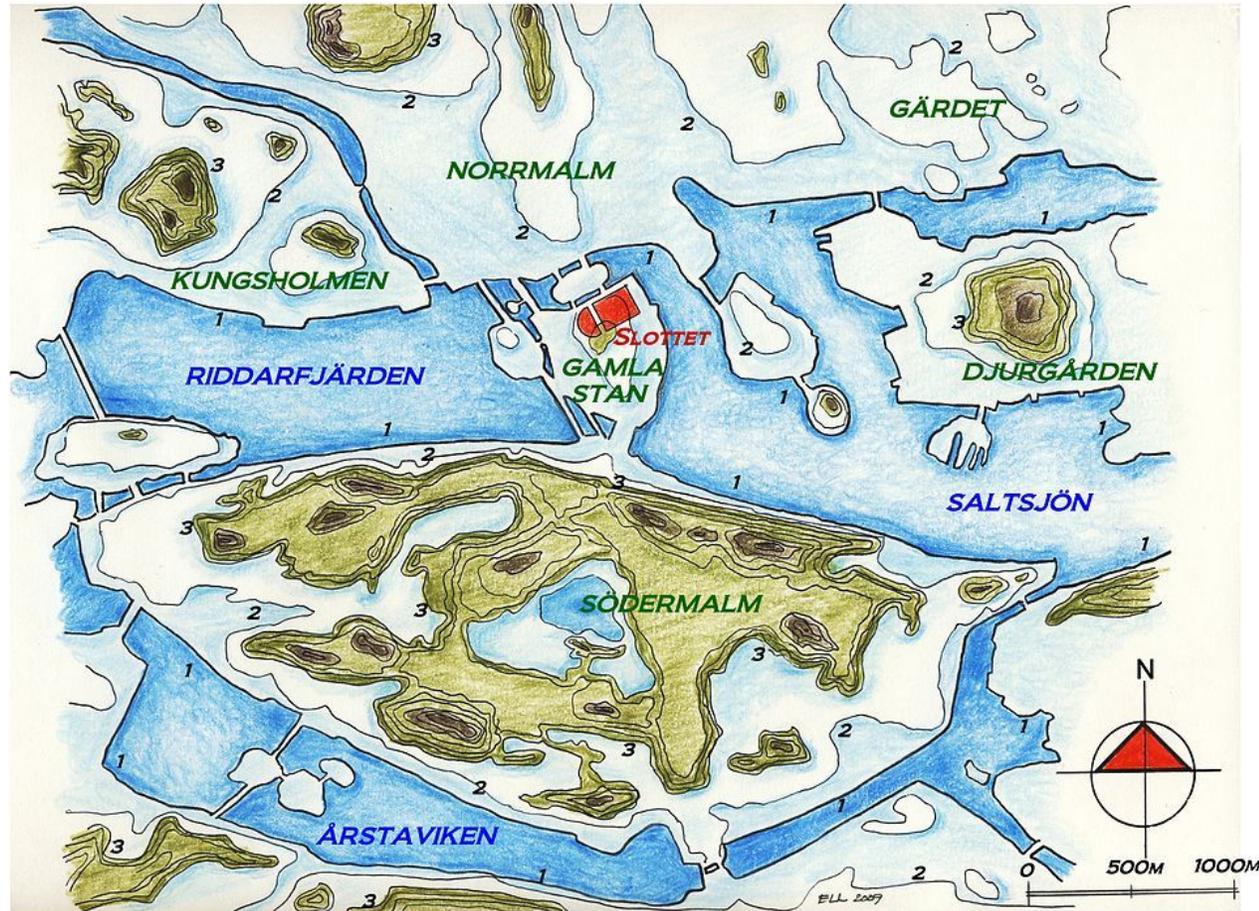


Tectonique des plaques : effets divers

Rebond glaciaire

La terre monte – Rebond glaciaire

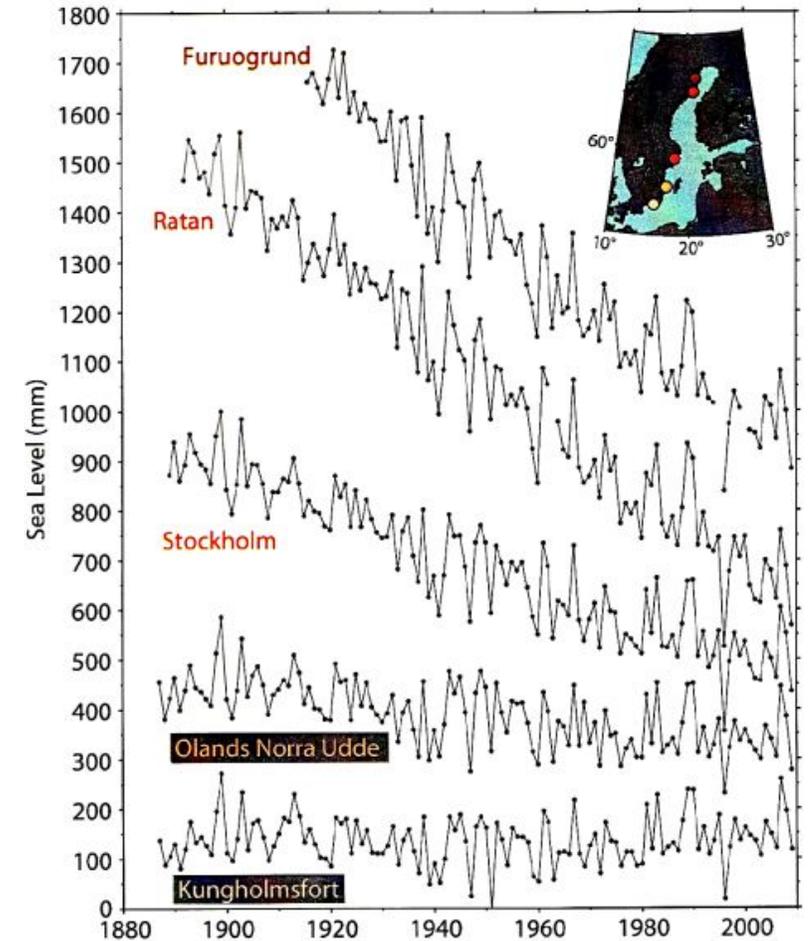
AUSWIRKUNG DER POSTGLAZIALEN LANDHEBUNG IN STOCKHOLM



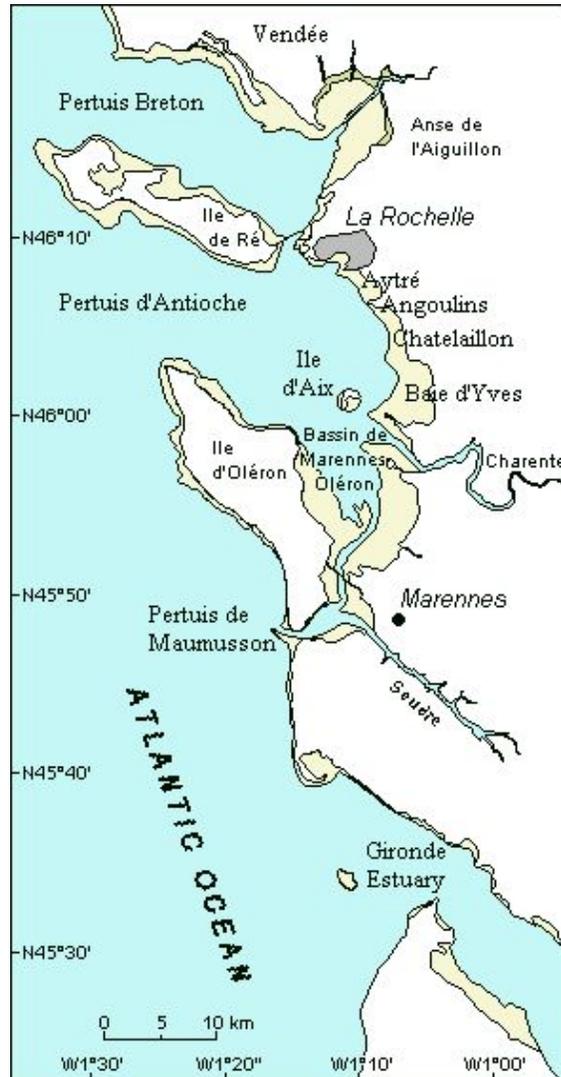
QUELLEN: SVENSKA TURISTFÖRENINGEN UND
KARTOGRAFISKA INSTITUTET

- 1: STRANDLINIE IM JAHR 2000 (HEUTE)
- 2: STRANDLINIE IM JAHR NULL (-10 M)
- 3: STRANDLINIE IM JAHR 2000 V.CHR. (-25 M)

Niveau de la mer relatif mesuré par les marégraphes en Suède



Les Apports d'alluvions – Les Pertuis !



Université de La Rochelle :

Elévation du niveau marin de **1.37 mm par an +/- 0.08 mm** sur la période **1860-2010** soit environ **14 cm par siècle**.

(Ces centièmes de mm sont à comparer à un marnage de plus de 6 m et des surcotes pouvant atteindre 1,50 m !)

La mer aurait donc dû s'étendre plus largement sur les derniers siècles mais il n'en est rien.

Pour quelles raisons ?

Le comblement de la baie des Pictons



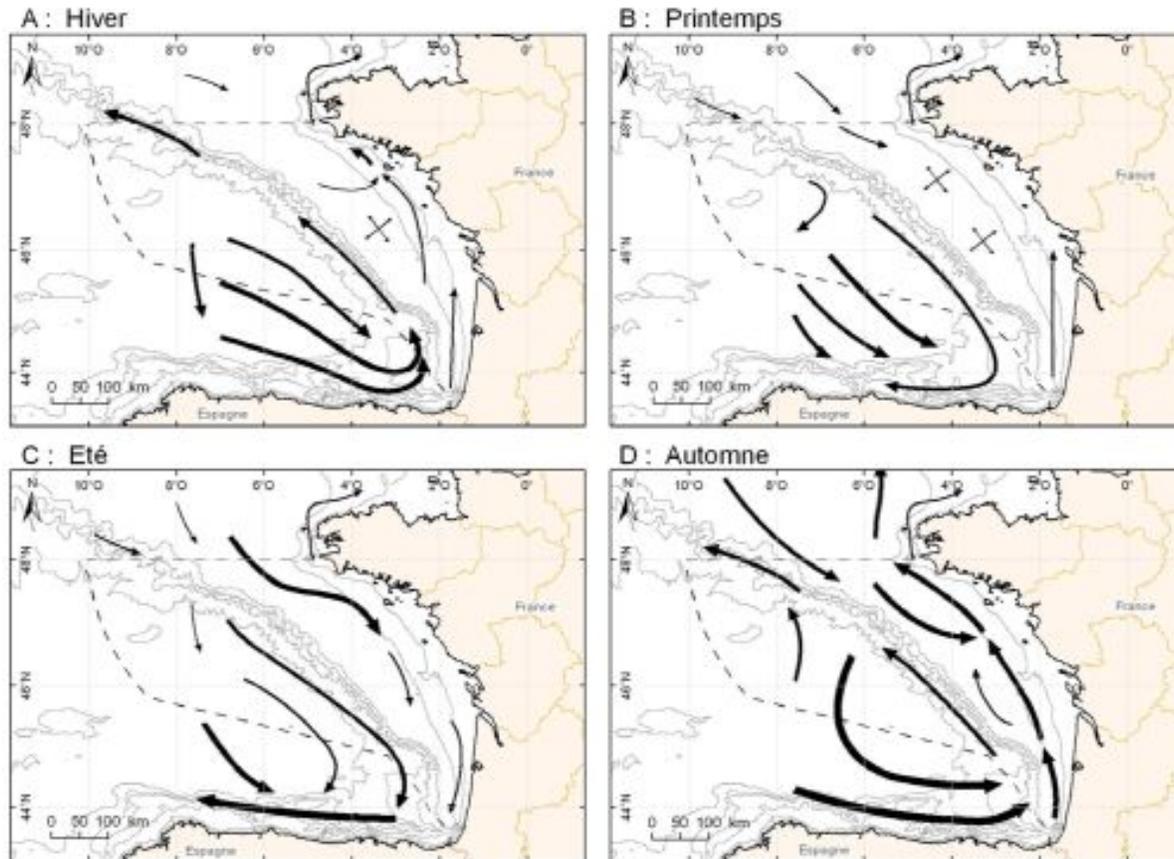
Comblement de la baie des Pictons aujourd'hui baie de l'Aiguillon.

De Luçon à la côte actuelle : environ 10 Km

De Niort à la côte actuelle : environ 40 km

Le comblement

Plus la mer monte, plus elle recule – Explication du paradoxe :



Apport d'alluvions par les courants

- Eté : alluvions de la Vaine et de la Loire
- Automne - Hiver : alluvions de la Garonne et de la Charente

Apport fluvial local

- Sèvre Niortaise et le Lay , de la Charente, de la Seudre.

Obstacles favorisant le dépôt

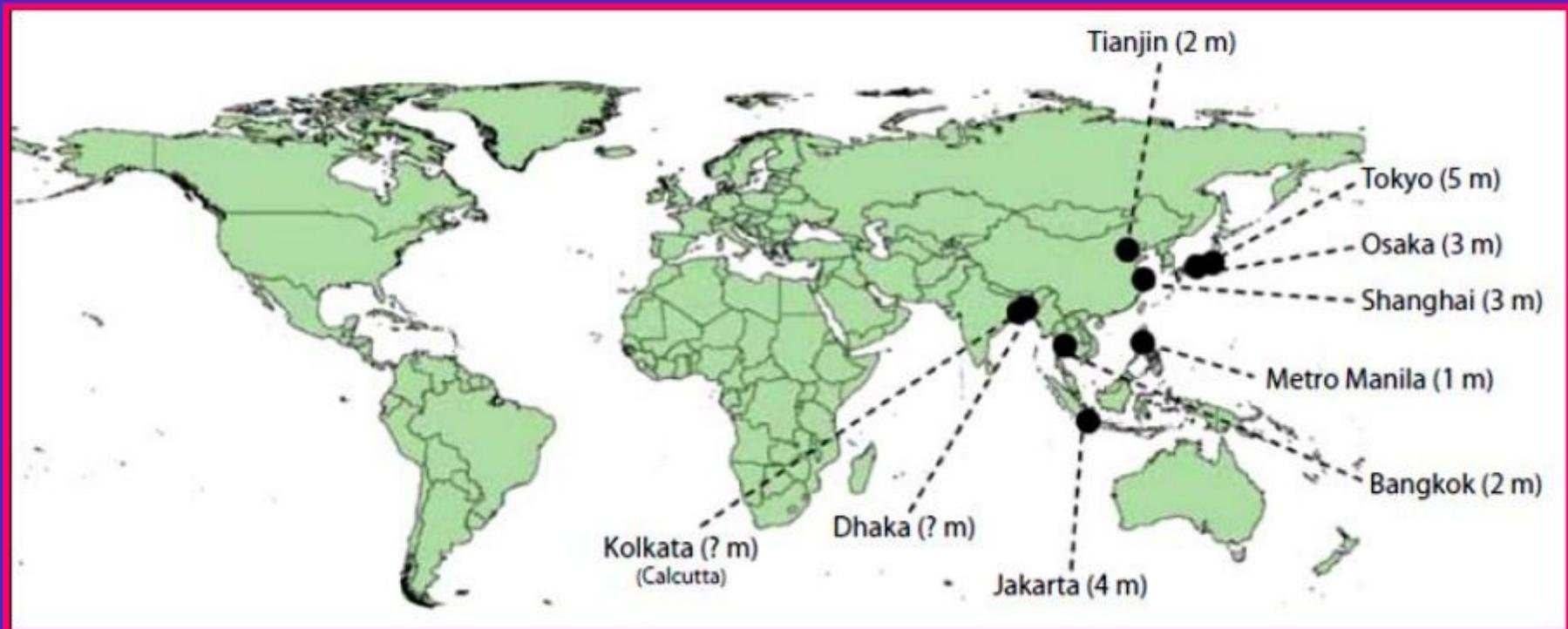
- L'île de Ré et l'île d'Oléron

La terre descend - causes

- Mouvements verticaux des plaques terrestres
- Enfouissement des mégapoles : « *SUBSIDENCE* »
 - Ecrasement des sédiments
 - Prélèvement / nappe phréatique
 - Prélèvement / nappe pétrolifère
 - Géothermie

La terre descend - causes

Subsidence de quelques mégapoles au cours des dernières décennies



La terre descend - JAKARTA



JAKARTA (Capitale de l'Indonésie / Ile de Java)
(10 millions d'âmes - conurbation de 30 millions ?)

Affaissement

- 1 à 15 cm par an depuis 1982 – zones à 28 cm/an par an
- Montée du niveau de la mer (<3 mm par an = négligeable)
- 20% de la mégapole sous le niveau de la mer
- 2 fois plus en 2050

Causes

- Pompage massif des eaux souterraines
- Poids des constructions sur des sols alluviaux

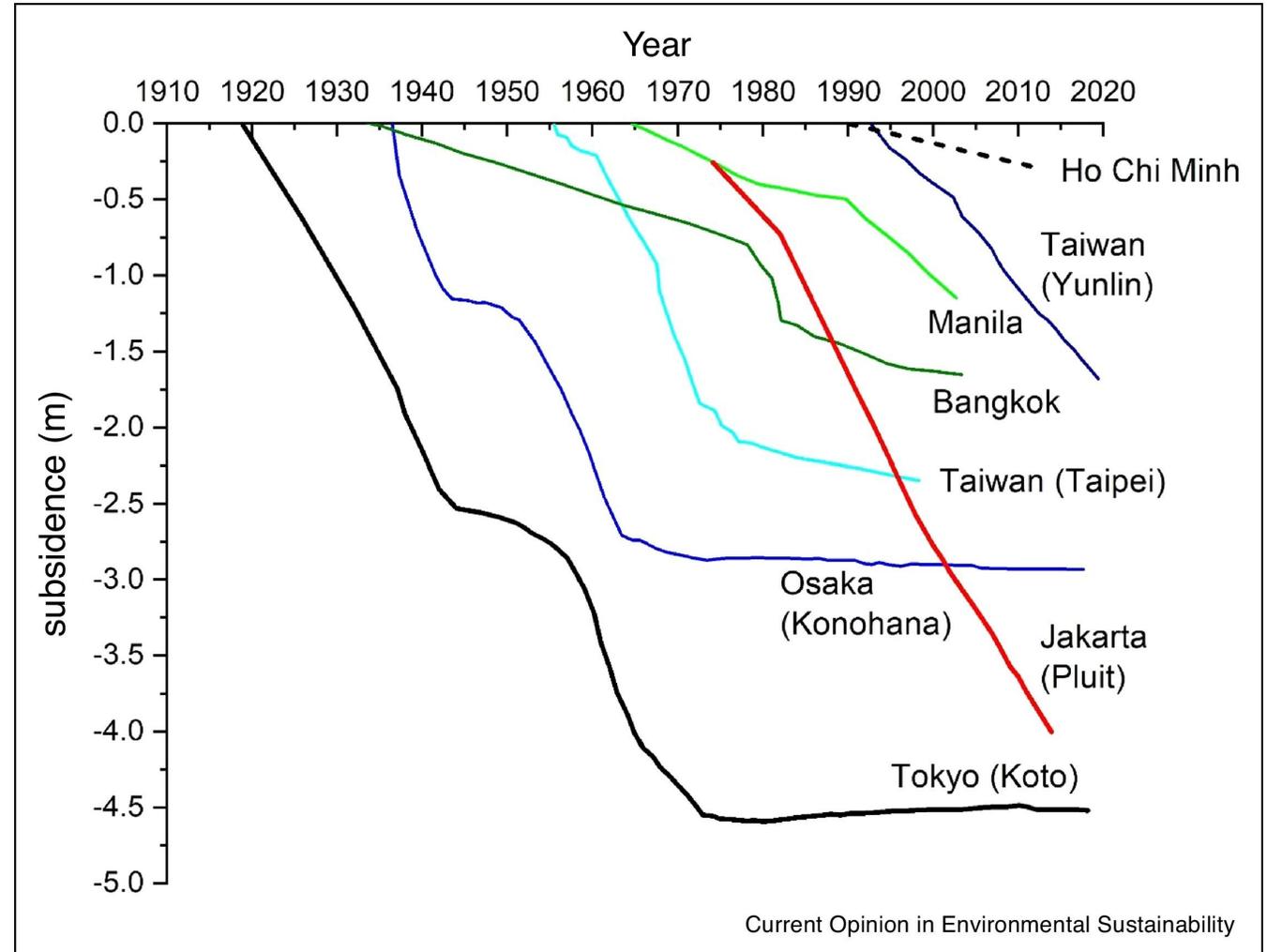
Adaptations

- Grande muraille maritime de 35 km (construction à partir de 2014)
- Déménagement de la capitale sur l'île de Bornéo

La terre descend - causes



TOKIO



Current Opinion in Environmental Sustainability

Les déformations verticales du globe terrestre

Phénomènes

Ordre de grandeur

Tectonique des Plaques

centimètre / an

Rebond glaciaire

centimètre / an

Apport d'alluvions

centimètre / an

Enfoncement des mégapoles

du centimètre au décimètre / an

A comparer aux millimètres / an du niveau des océans

Résumé « technique »

Les variations des altitudes terrestres et du niveau des océans sont infimes par rapports aux rayons de notre l'ellipsoïde.

Les moyens de mesure progressent mais la marge d'incertitude reste importante.

Nous ignorons l'évolution des températures des océans au-delà de 1900 mètres

Les variations de l'activité solaire sont connues mais imprévisibles

Les variations de l'activité volcanique sous-marine sont inconnues et imprévisibles

Les enfoncements des mégapoles sont indépendants du niveau des océans.

Adaptations

Les théories climatiques globales sont intéressantes mais ont peu d'utilité pratique. Les évolutions sont propres à chaque région et parfois inverses d'une région à l'autre.

Les mouvements terrestres naturels sont nettement plus importants que la montée du niveau des océans. Globalement, c'est la surface des terres qui augmente.

Ces phénomènes sont relativement lents et permettent donc une adaptation progressive, comme nous l'avons fait depuis le petit âge glaciaire : digues, poldérisation, urbanisme adapté, aménagement du territoire, etc.

Le mécanisme de l'enfoncement des mégapoles est bien compris. Les solutions sont simples à énoncer mais, économiquement et humainement, extrêmement difficiles à appliquer.

Vos questions ?



Tahiti – Point amphidromique : absence de marées