Énergie et environnement

Émile Knystautas

- B.Sc. (U. Montréal), M.S. et Ph.D. (U. Connecticut), tous en Physique

- Depuis 1969, professeur de Physique à l'Université Laval, sauf pour...

- 1978 – 1979, Chercheur invité, Atomic and Plasma Radiation Division, National Bureau of Standards (présentement N.I.S.T.), Washington

- 2004 – 2006, « Direttore scientifico », Nanofab, s.c.a.r.l., Venise

- Introduction
- Les flux d'énergie (sources et consommation)
- Les sources d'énergie
    - Fossiles (charbon, gaz naturel, bois, pétrole)
    - Nucléaire (fission, fusion)
    - Renouvellables (solaire, éolienne, hydroélectrique, etc.)
- Efficacité de consommation et conservation
- Aspects économiques et politiques
- Perspectives

Des chiffres, pas des adjectifs!

- La science est quantitative de par sa nature, et la science de l'énergie ne fait pas exception
- Lorsqu'on parle de l'approvisionement, du transport ou de la consommation de l'énergie, il est indispensable de parler en termes de « combien », avec les unités appropriées
- Il y a un grand nombre d'unités utilisées dans ce secteur et il faut pouvoir naviguer entre elles

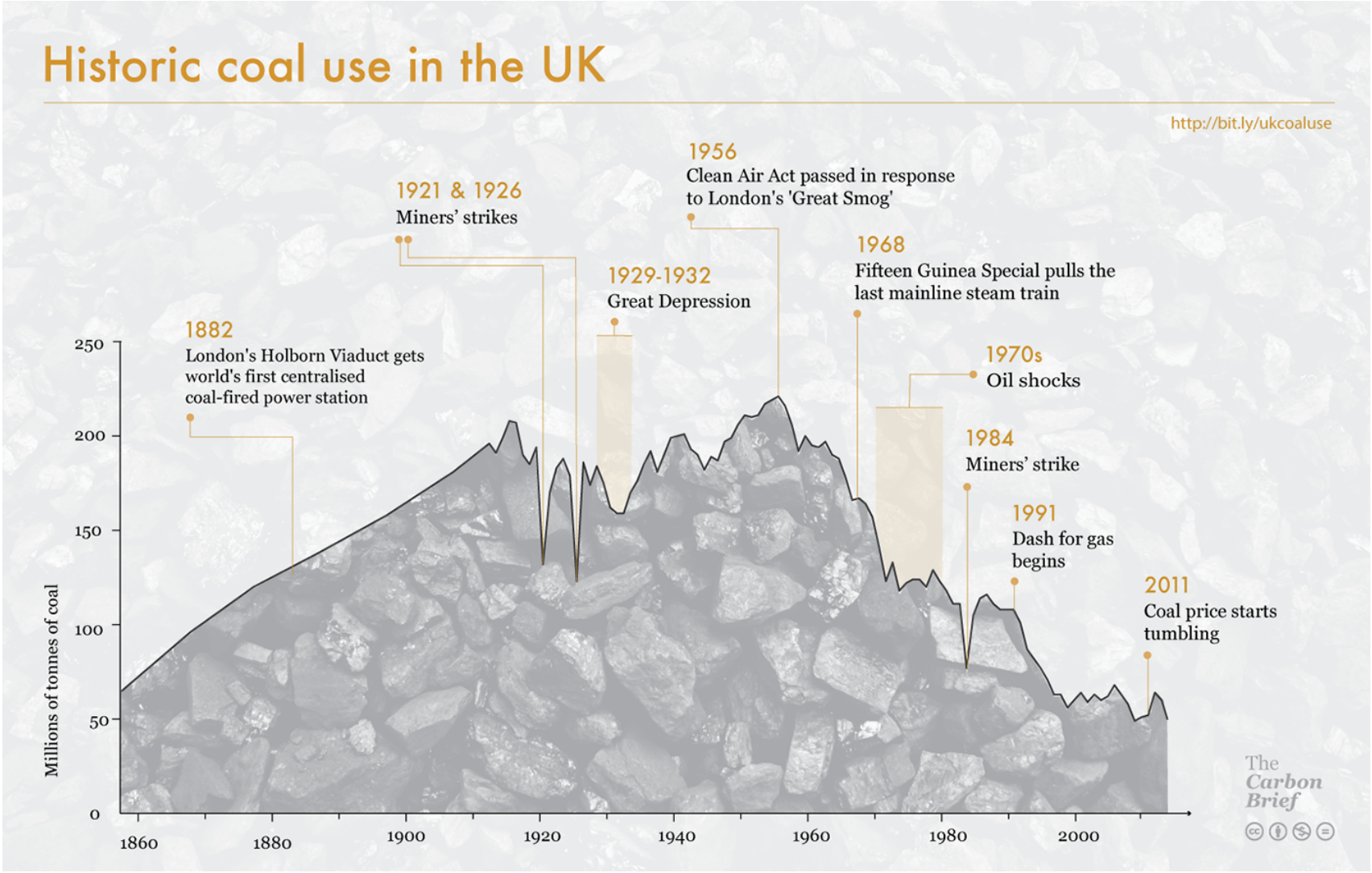
La pollution et la production d'énergie

- Lorsqu'on produit de l'énergie il faut penser aux conséquences environnementales
- Durant la Révolution industrielle et encore aujourd'hui dans certains pays, les effets de brûler le charbon étaient/sont dramatiques
- Un des exemples les plus frappants se trouve dans l'évolution rapide de la phalène du bouleau (*Biston betularia*)

© University of Pittsburgh

Beijing durant les alertes rouges et en temps normal

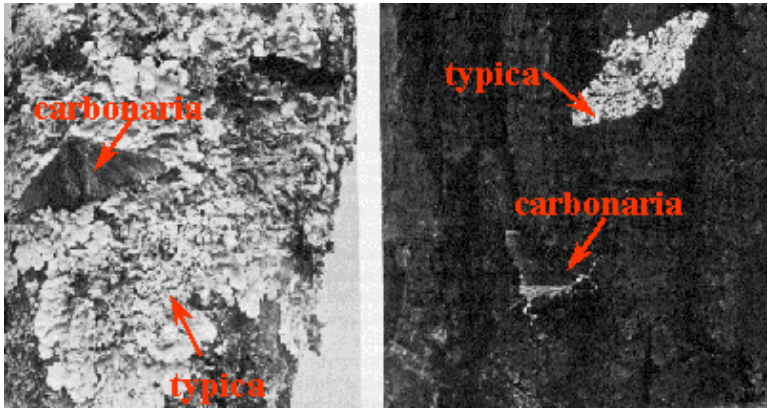
Historique de la consommation du charbon au Royaume-Uni



L'effet du charbon sur la Phalène du boulot au Royaume-Uni

Au début, cet insect, Biston betularia **typica,** était poivré

Avec l'utilisation très intensive du charbon durant la Révolution industrielle, la coloration des ailes de l'insecte est devenue très foncée. L'insecte s'appellait alors Biston betularia **carbonaria**



On attribue cette « évolution accélérée » au fait que la phalène profitait du camouflage qui la rendait presque invisible avec le noircissement accru des boulots par la polution au charbon

Aujourd'hui, l'air pur est revenu et c'est la poivrée qui est dominante de nouveau!

Unités d'énergie et de puissance

Il faut distinguer deux types d'unités ici, celles fondamentales qui ont une définition précise (p.ex. joule, watt, kWh) et celles reliées à un type de source particulière, donc par définition approximatives (p.ex. tonne de charbon, baril de pétrole ou gram d'uranium-235)

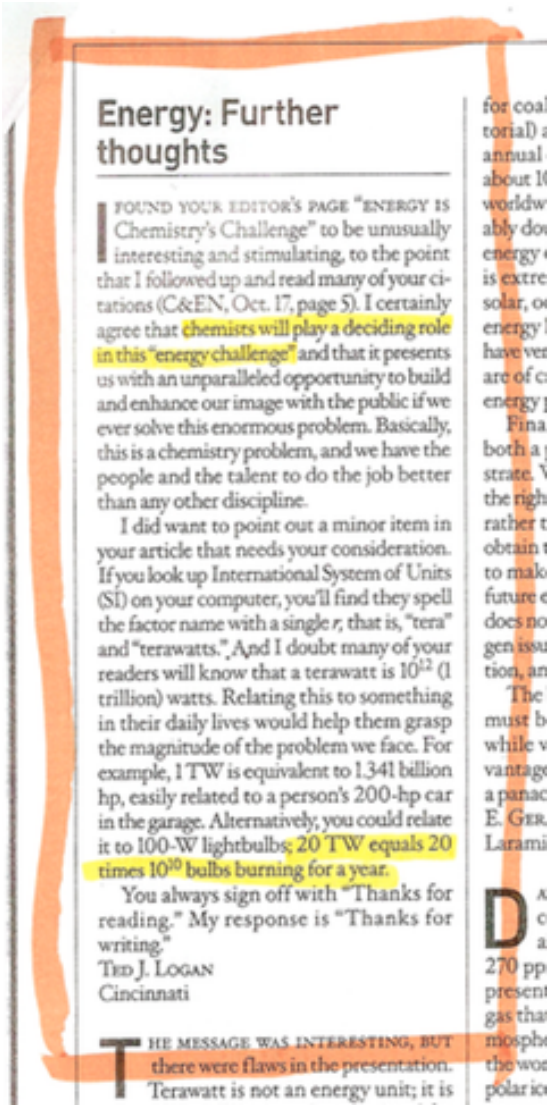
Puissance = Énergie/Temps

Les unités les plus utilisées

- **Énergie**:
  - Mtoe, BTU, J, kWh, Calories, calories
  - Quelques conversions entre certaines unités d'énergie:
  - 1 BTU = 1055 J
  - 1 Calorie = 1000 calories = 4184 J
  - 1 kWh = 3,6 MJ = 3412 BTU
  - 1 quad = 10^{15} BTU = 1,055 EJ (exajoules = 10^{18} J)
  - 1 Mtoe (megaton oil equivalent) = 4,187 x 10^{16} J
- **Puissance**:
  - kW, MW (1 W = 1 J/s)

Même les journalistes scientifiques se trompent!

Exemple: Lettre à C&EN du 12 déc. 2005 et réplique du 27 mars 2006



Energy: Further thoughts

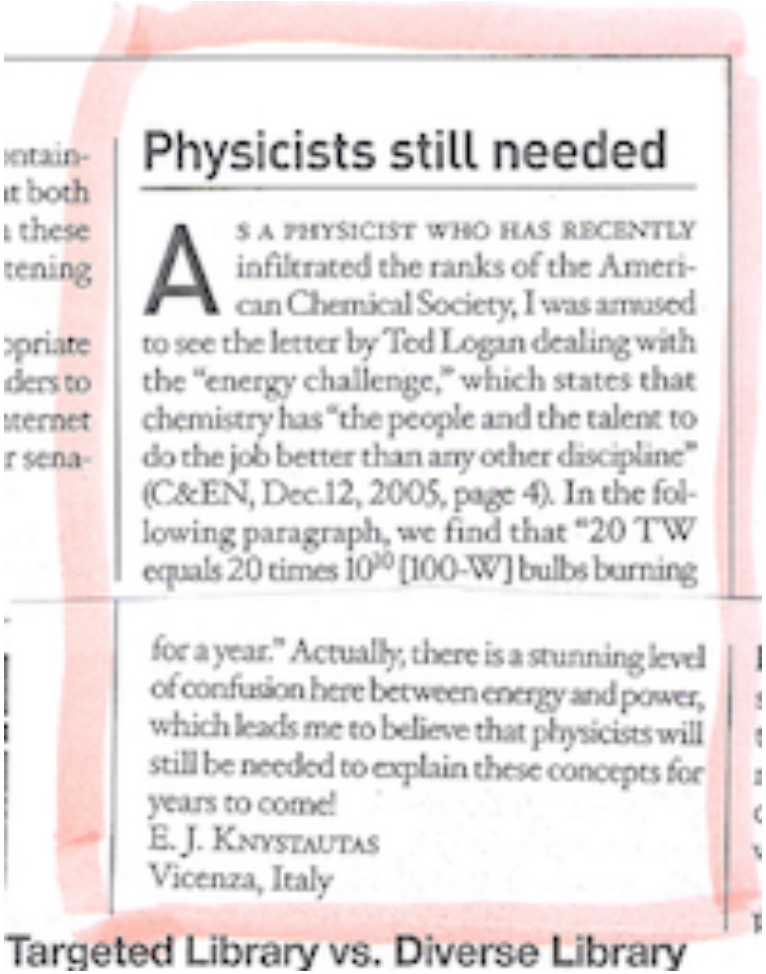
I FOUND YOUR EDITOR'S PAGE "ENERGY IS Chemistry's Challenge" to be unusually interesting and stimulating, to the point that I followed up and read many of your citations (C&EN, Oct. 17, page 5). I certainly agree that chemists will play a deciding role in this "energy challenge" and that it presents us with an unparalleled opportunity to build and enhance our image with the public if we ever solve this enormous problem. Basically, this is a chemistry problem, and we have the people and the talent to do the job better than any other discipline.

I did want to point out a minor item in your article that needs your consideration. If you look up International System of Units (SI) on your computer, you'll find they spell the factor name with a single *r*, that is, "tera" and "terawatts." And I doubt many of your readers will know that a terawatt is 10^{12} (1 trillion) watts. Relating this to something in their daily lives would help them grasp the magnitude of the problem we face. For example, 1 TW is equivalent to 1.341 billion hp, easily related to a person's 200-hp car in the garage. Alternatively, you could relate it to 100-W lightbulbs: 20 TW equals 20 times 10^{10} bulbs burning for a year.

You always sign off with "Thanks for reading." My response is "Thanks for writing."

TED J. LOGAN
Cincinnati

THE MESSAGE WAS INTERESTING, BUT there were flaws in the presentation. Terawatt is not an energy unit; it is



Physicists still needed

AS A PHYSICIST WHO HAS RECENTLY infiltrated the ranks of the American Chemical Society, I was amused to see the letter by Ted Logan dealing with the "energy challenge," which states that chemistry has "the people and the talent to do the job better than any other discipline" (C&EN, Dec.12, 2005, page 4). In the following paragraph, we find that "20 TW equals 20 times 10^{10} [100-W] bulbs burning for a year." Actually, there is a stunning level of confusion here between energy and power, which leads me to believe that physicists will still be needed to explain these concepts for years to come!

E. J. KNYSTAUTAS
Vicenza, Italy

Targeted Library vs. Diverse Library

Les différentes formes d'énergie

- Mécanique (potentielle et cinétique, p.ex., hydroélectrique, éolienne, marémotrice)
- Thermique (p. ex. géothermique)
- Radiante (p. ex. solaire)
- Électrique
- Chimique (l'alimentation, les combustibles fossiles)
- Nucléaire (fission, fusion)

Facteurs de conversion pour les unités

1 BTU (British Thermal Unit) = 1055 J

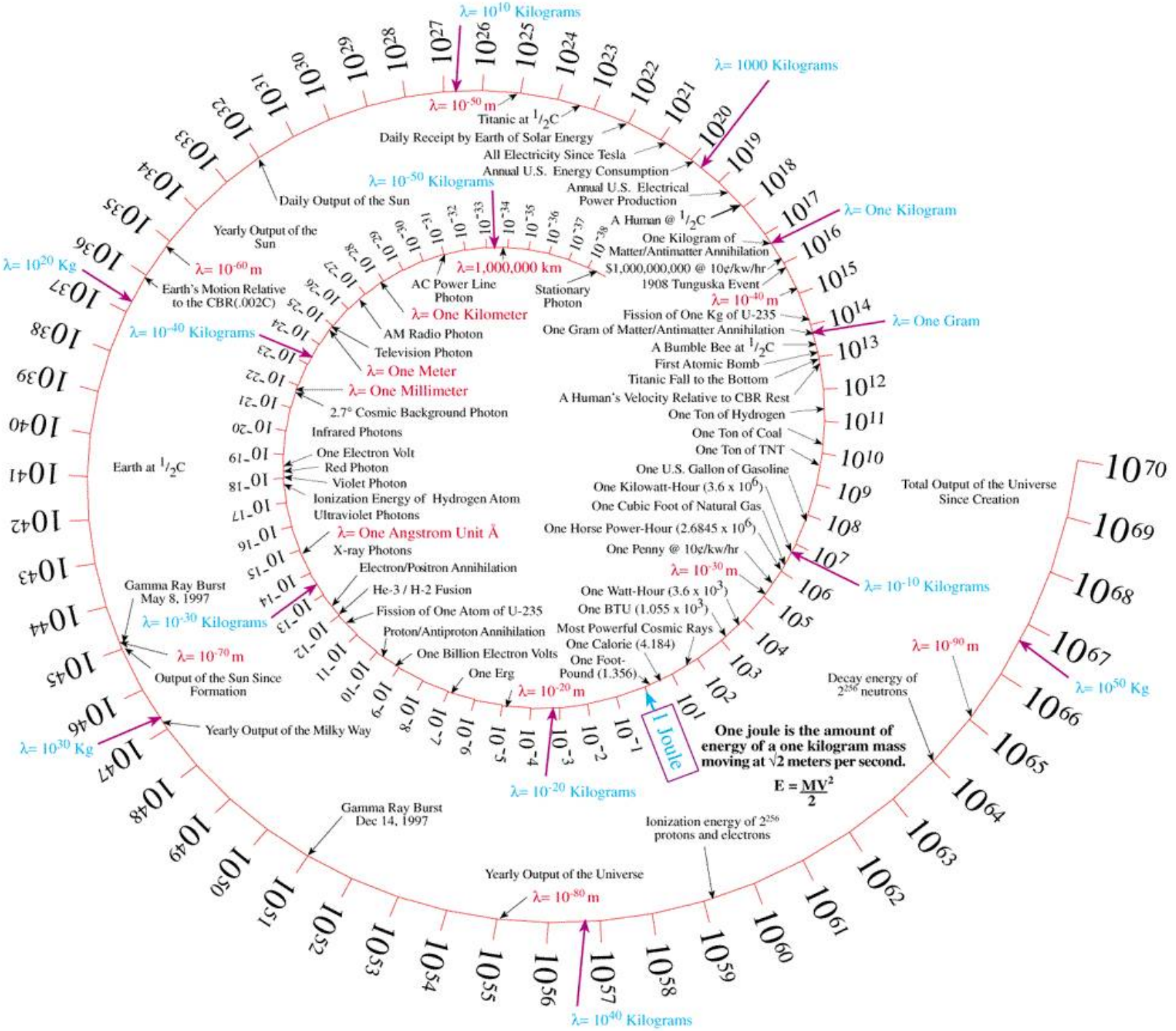
1 kWh = 3412 BTU

1 Calorie = 1000 calories

1 W = 1 J/s = 3,412 BTU/h

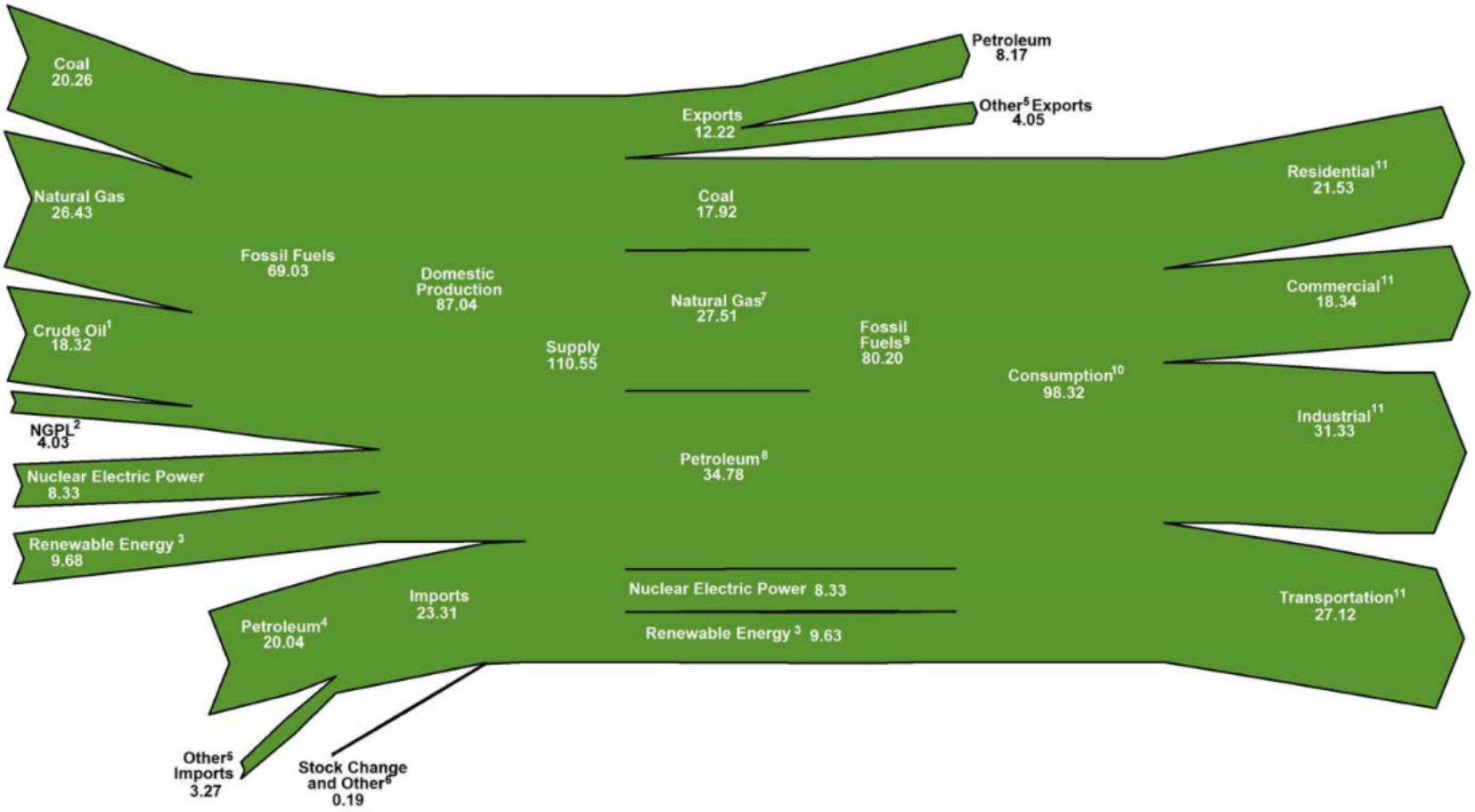
1 BTU/jour = 12,2 kW

1 baril de pétrole = 159,0 L ~ 0,136 tonnes

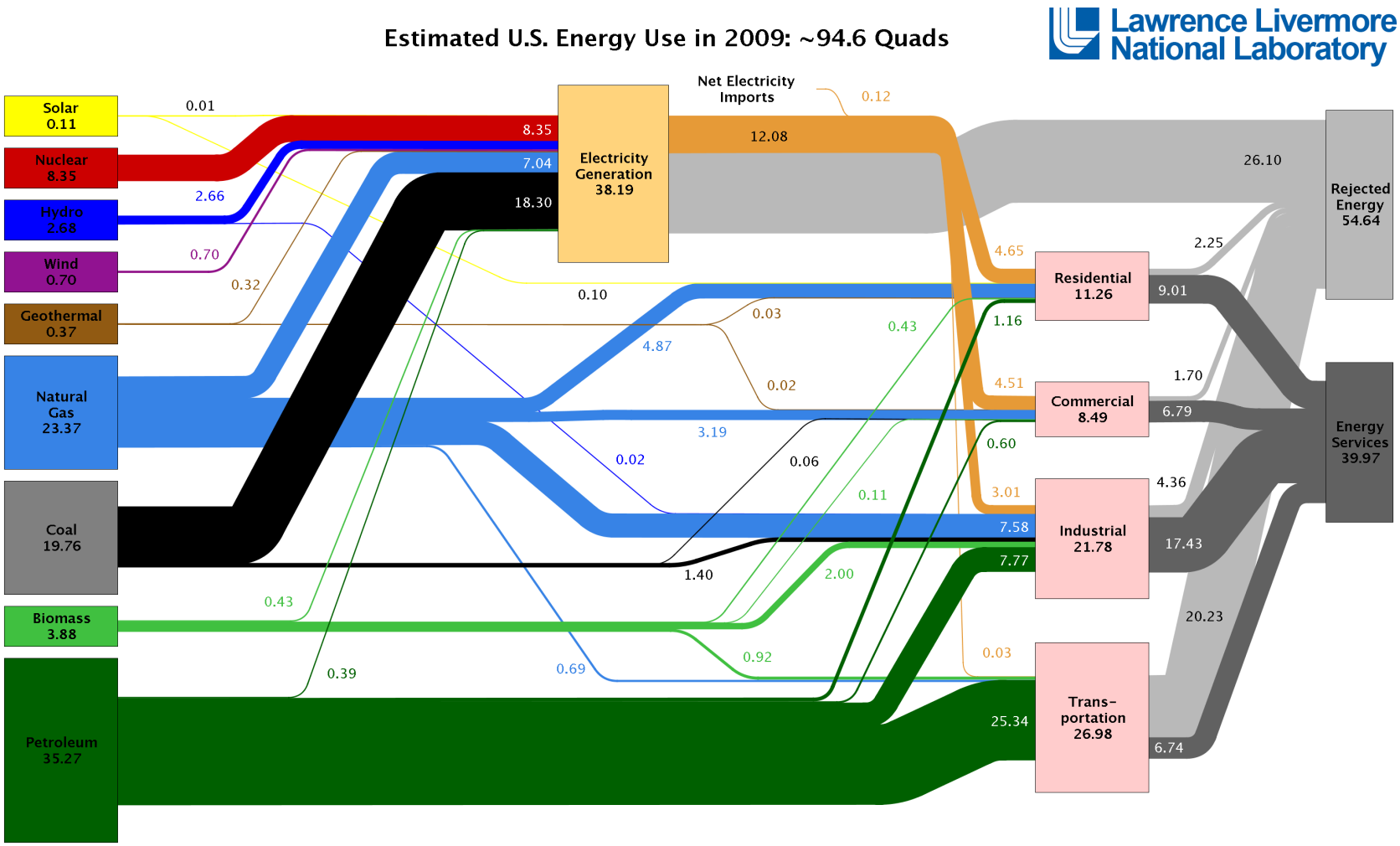

λ= 10^10 Kilograms
λ= 1000 Kilograms
λ= One Kilogram
λ= One Gram
λ= 10^-10 Kilograms
λ= 10^-20 Kilograms
λ= 10^-30 Kilograms
λ= 10^-40 Kilograms
λ= 10^-50 Kilograms
λ= 10^20 Kg
λ= 10^30 Kg
λ= 10^50 Kg
λ= 10^-50 m
λ= 10^-60 m
λ= 10^-70 m
λ= 10^-80 m
λ= 10^-90 m
λ= 10^-40 m
λ= 10^-30 m
λ= 10^-20 m
λ=1,000,000 km
λ= One Kilometer
λ= One Meter
λ= One Millimeter
λ= One Angstrom Unit Å
Titanic at 1/2C
Daily Receipt by Earth of Solar Energy
All Electricity Since Tesla
Annual U.S. Energy Consumption
Annual U.S. Electrical Power Production
A Human @ 1/2C
One Kilogram of Matter/Antimatter Annihilation
$1,000,000,000 @ 10¢/kw/hr
1908 Tunguska Event
Fission of One Kg of U-235
One Gram of Matter/Antimatter Annihilation
A Bumble Bee at 1/2C
First Atomic Bomb
Titanic Fall to the Bottom
A Human's Velocity Relative to CBR Rest
One Ton of Hydrogen
One Ton of Coal
One Ton of TNT
One U.S. Gallon of Gasoline
One Kilowatt-Hour (3.6 x 10^6)
One Cubic Foot of Natural Gas
One Horse Power-Hour (2.6845 x 10^6)
One Penny @ 10¢/kw/hr
One Watt-Hour (3.6 x 10^3)
One BTU (1.055 x 10^3)
Most Powerful Cosmic Rays
One Calorie (4.184)
One Foot-Pound (1.356)
1 Joule
One joule is the amount of energy of a one kilogram mass moving at √2 meters per second.
E = MV²/2
One Erg
One Billion Electron Volts
Proton/Antiproton Annihilation
Fission of One Atom of U-235
He-3 / H-2 Fusion
Electron/Positron Annihilation
X-ray Photons
Ultraviolet Photons
Ionization Energy of Hydrogen Atom
Violet Photon
Red Photon
One Electron Volt
Infrared Photons
2.7° Cosmic Background Photon
Television Photon
AM Radio Photon
AC Power Line Photon
Stationary Photon
Daily Output of the Sun
Yearly Output of the Sun
Earth's Motion Relative to the CBR(.002C)
Earth at 1/2C
Gamma Ray Burst May 8, 1997
Output of the Sun Since Formation
Yearly Output of the Milky Way
Gamma Ray Burst Dec 14, 1997
Yearly Output of the Universe
Ionization energy of 2^256 protons and electrons
Decay energy of 2^256 neutrons
Total Output of the Universe Since Creation

- Introduction
- **Les flux d'énergie (sources et consommation)**
- Les sources d'énergie
    - Fossiles (charbon, gaz naturel, bois, pétrole)
    - Nucléaire (fission, fusion)
    - Renouvellables (solaire, éolienne, hydroélectrique, etc.)
- Efficacité de consommation et conservation
- Aspects économiques et politiques
- Perspectives

Les flux d'énergie



Énergie, de la source à la consommation

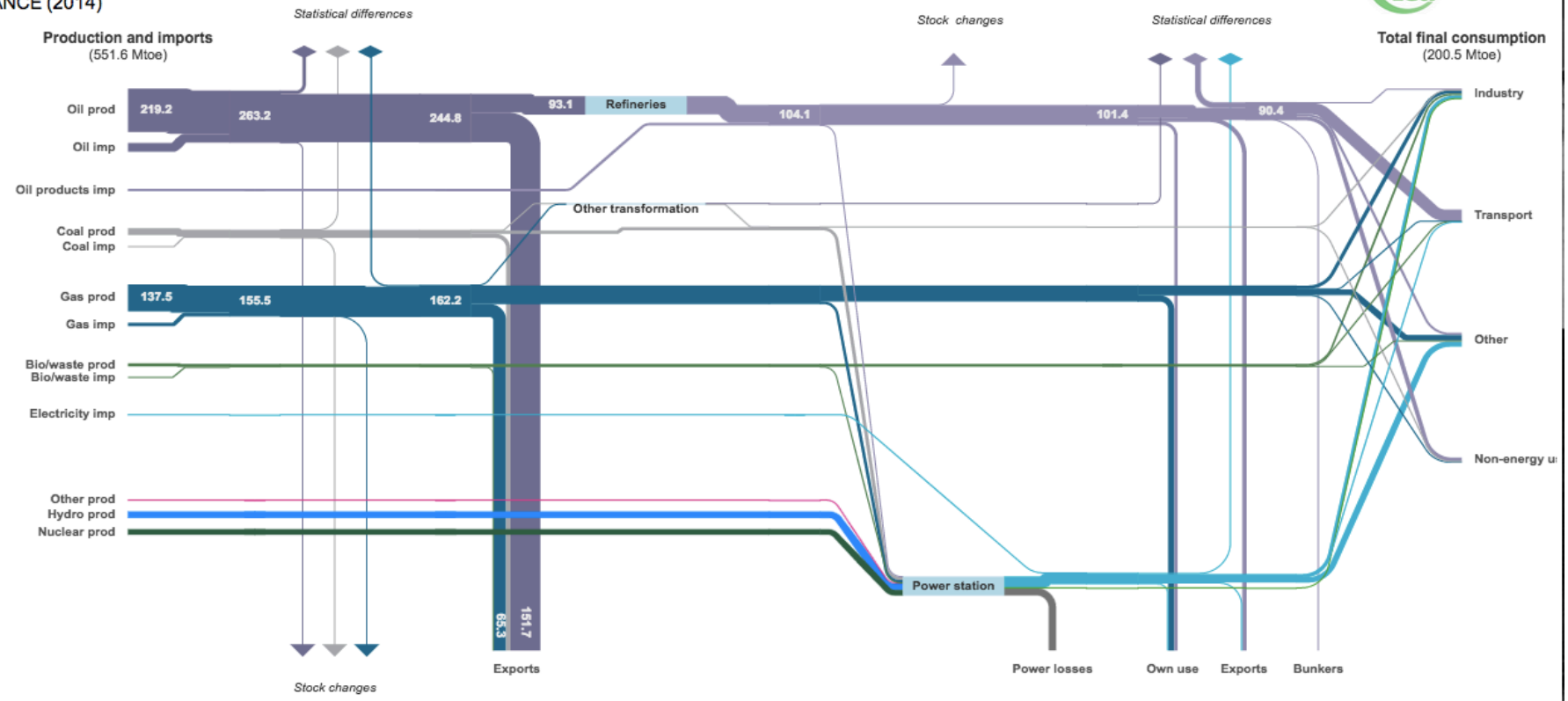


Source: LLNL 2010. Data is based on DOE/EIA-0384(2009), August 2010. If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the Department of Energy, under whose auspices the work was performed. Distributed electricity represents only retail electricity sales and does not include self-generation. EIA reports flows for non-thermal resources (i.e., hydro, wind and solar) in BTU-equivalent values by assuming a typical fossil fuel plant "heat rate." The efficiency of electricity production is calculated as the total retail electricity delivered divided by the primary energy input into electricity generation. End use efficiency is estimated as 80% for the residential, commercial and industrial sectors, and as 25% for the transportation sector. Totals may not equal sum of components due to independent rounding. LLNL-MI-410527

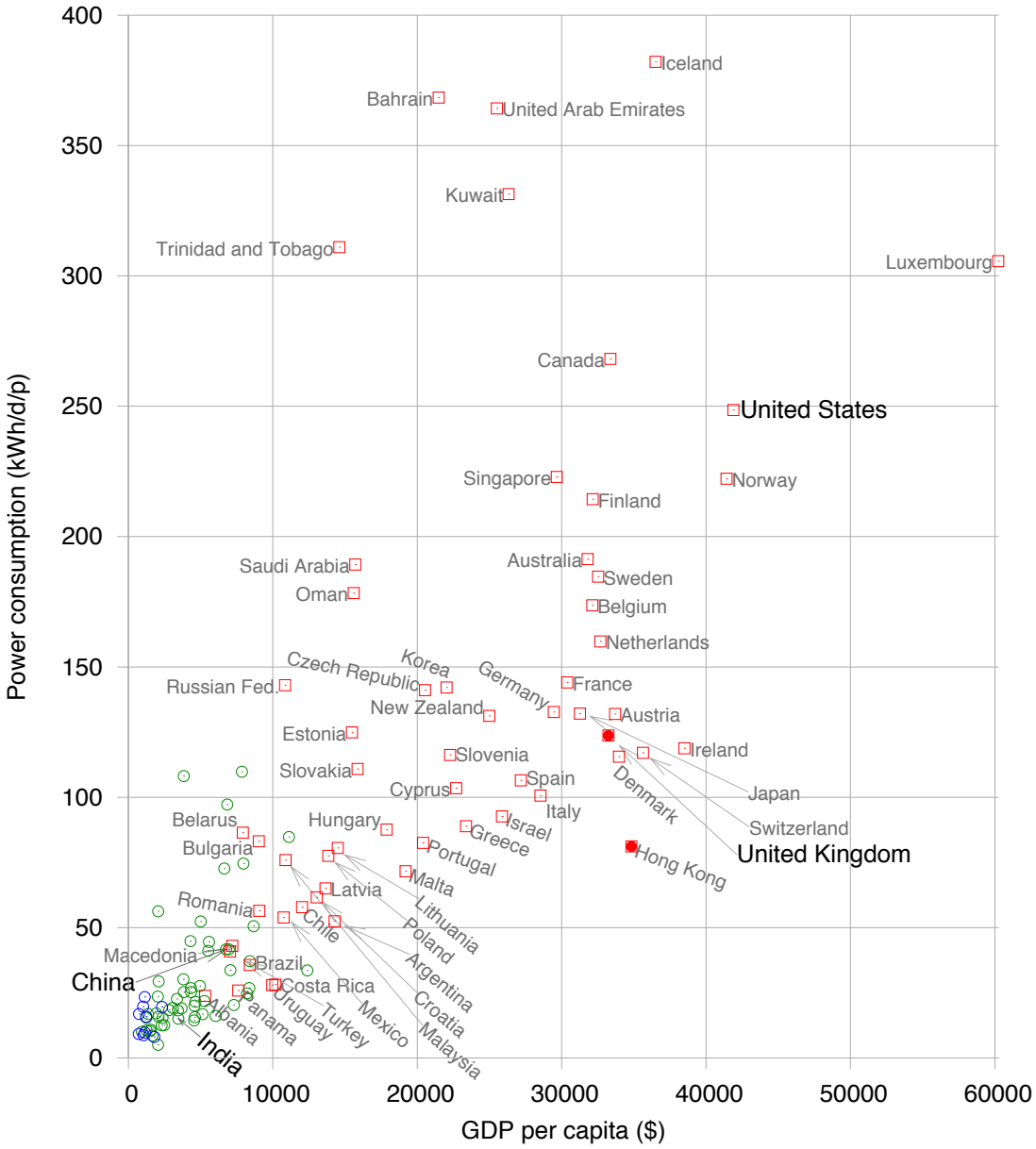
Canada

BALANCE (2014)

Millions of tonnes of oil equivalent



Consommation énergétique quotidienne par pays per capita



- Introduction
- Les flux d'énergie (sources et consommation)
- **Les sources d'énergie**
  - Fossiles (charbon, gaz naturel, bois, pétrole)
  - Nucléaire (fission, fusion)
  - Renouvellables (solaire, éolienne, hydroélectrique, etc.)
- Efficacité de consommation et conservation
- Aspects économiques et politiques
- Perspectives

Les énergies conventionnelles

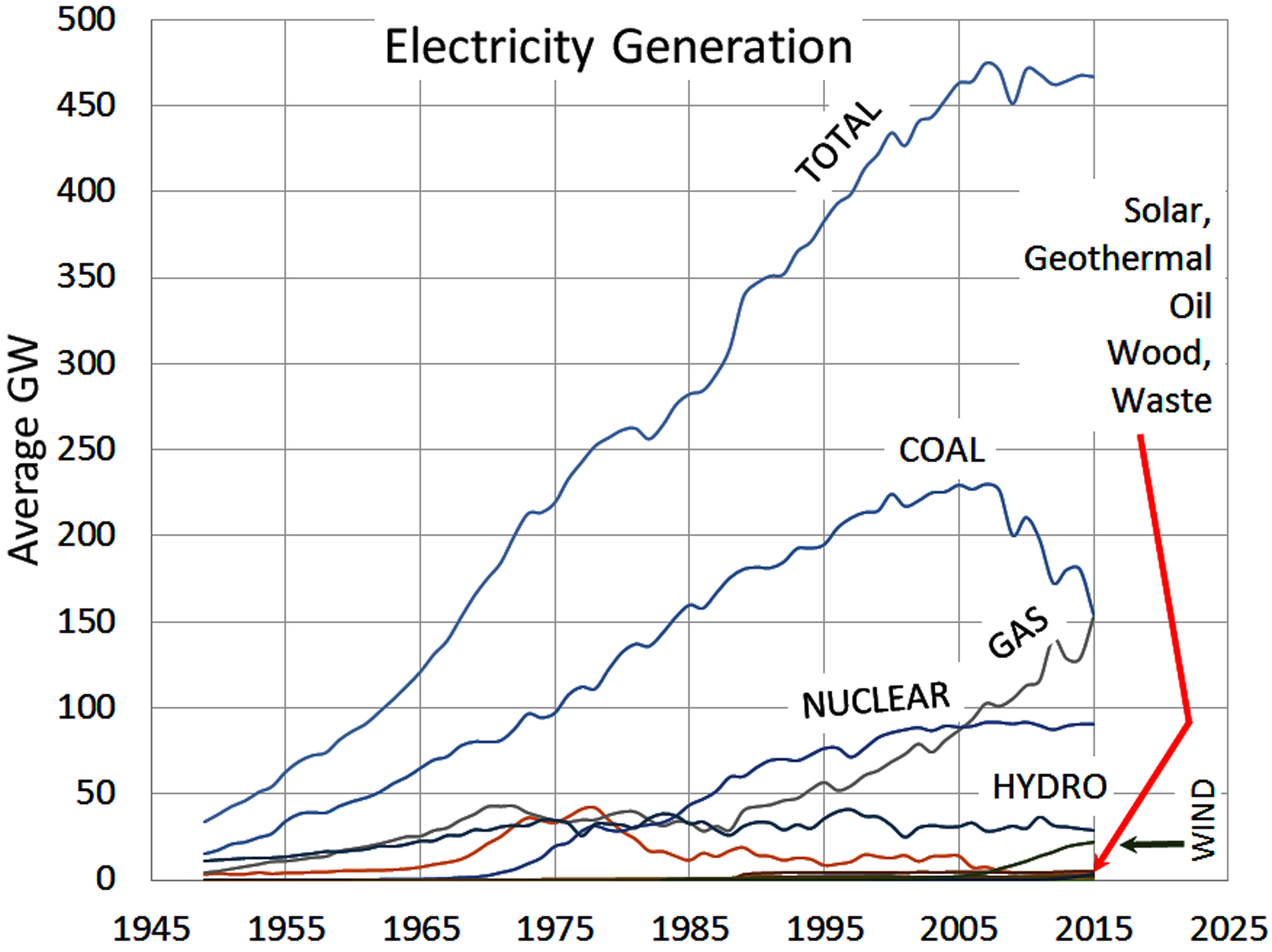
- Charbon
- Gaz naturel
- Nucléaire
- Bois
- Pétrole

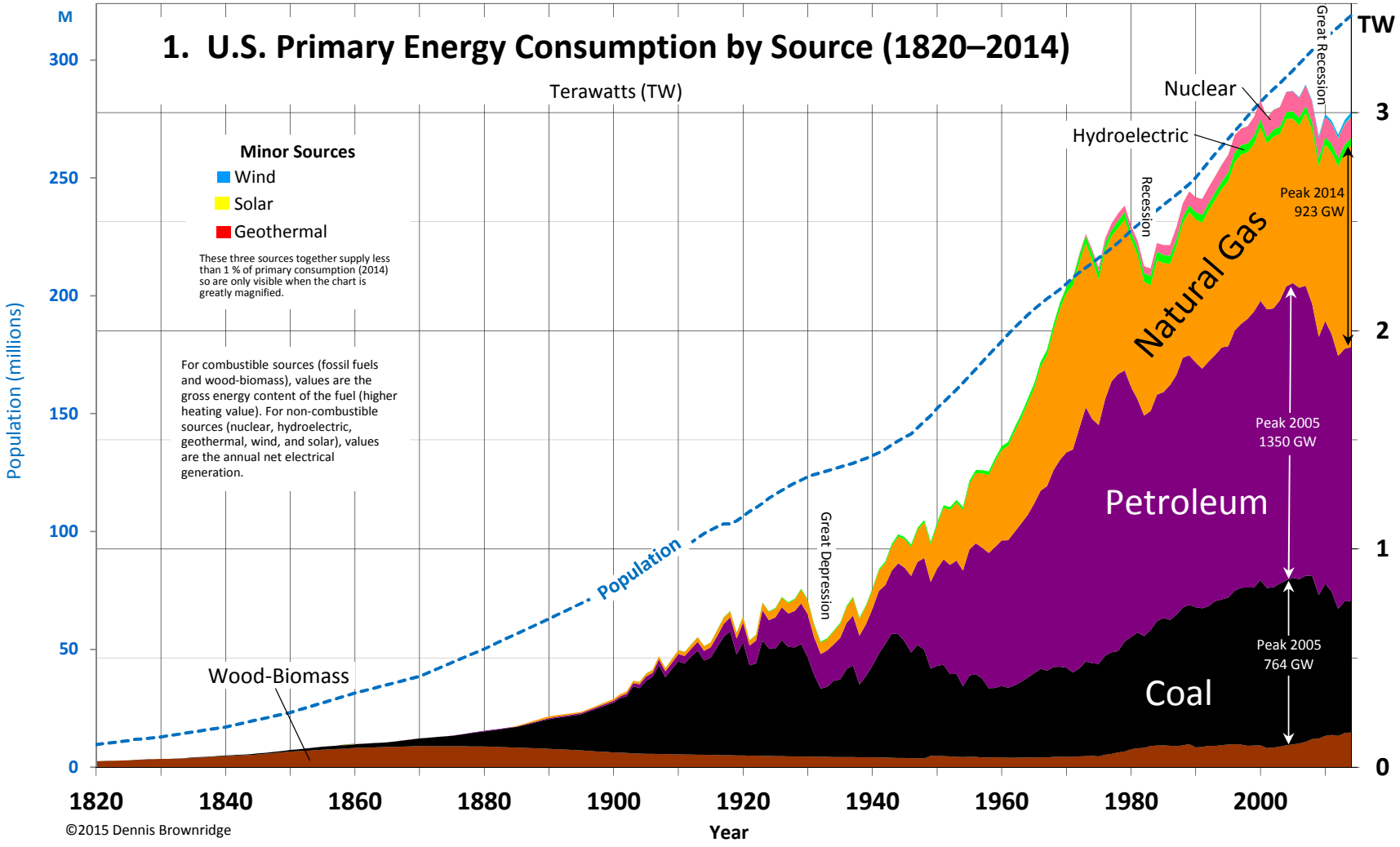
Les énergies renouvelables

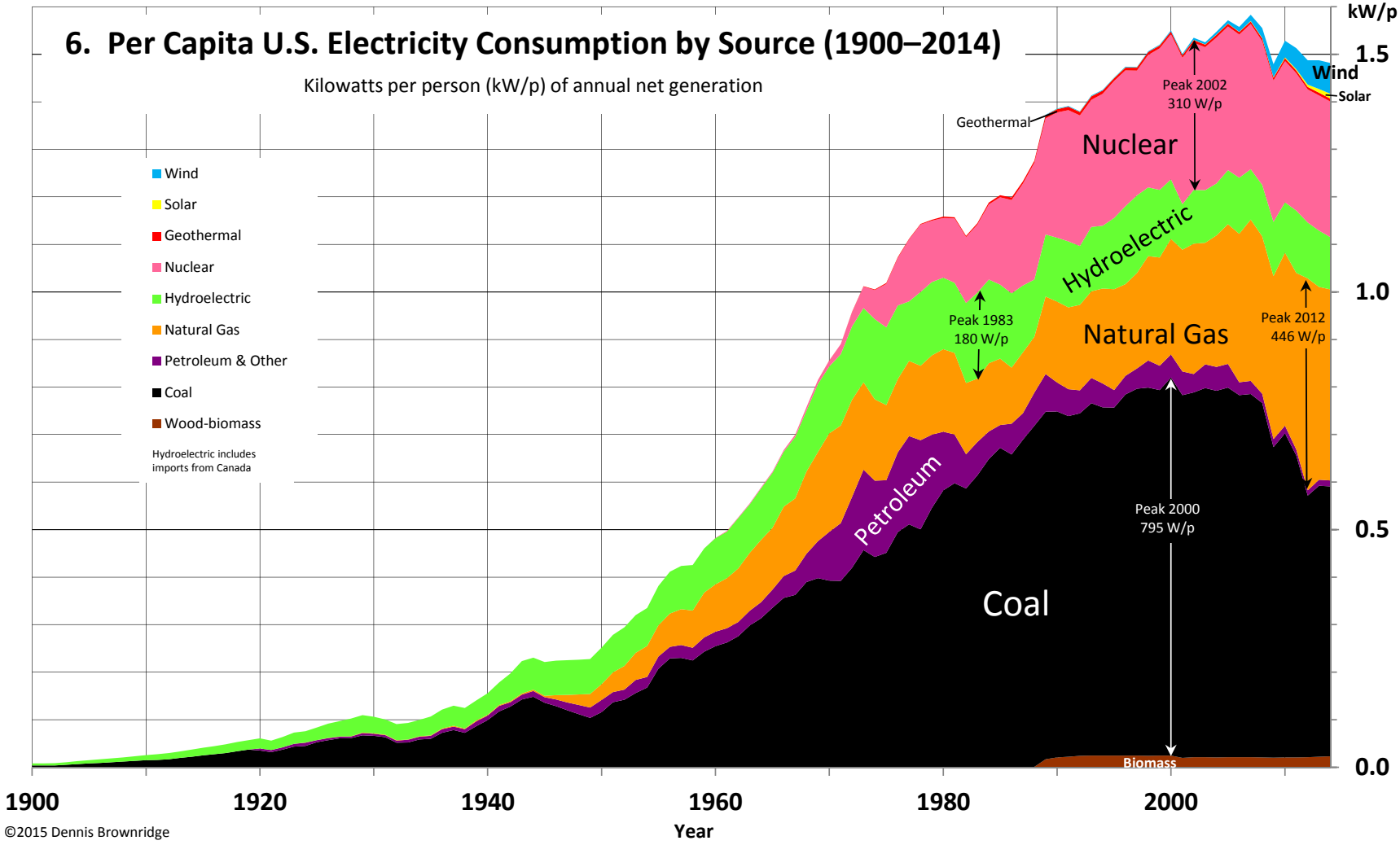
- Hydroélectrique
- Éolienne
- Biomasse
- Géothermique
- Marémotrice

- L'hydrogène??… n'est pas une source d'énergie (il n'existe pas de puits d'hydrogène), il est plutôt un vecteur ayant une basse densité d'énergie qui est donc plus difficile à transporter. En fait, il faut utiliser plus d'énergie pour produire l'hydrogène que ce qu'on peut en retirer.

Sources d'électricité (USA) en 2016




1. U.S. Primary Energy Consumption by Source (1820–2014)
Terawatts (TW)
M
TW
Population (millions)
300
250
200
150
100
50
0
3
2
1
0
Minor Sources
Wind
Solar
Geothermal
These three sources together supply less than 1 % of primary consumption (2014) so are only visible when the chart is greatly magnified.
For combustible sources (fossil fuels and wood-biomass), values are the gross energy content of the fuel (higher heating value). For non-combustible sources (nuclear, hydroelectric, geothermal, wind, and solar), values are the annual net electrical generation.
Nuclear
Hydroelectric
Great Recession
Recession
Peak 2014
923 GW
Natural Gas
Peak 2005
1350 GW
Petroleum
Peak 2005
764 GW
Coal
Population
Great Depression
Wood-Biomass
1820
1840
1860
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000
Year
©2015 Dennis Brownridge


6. Per Capita U.S. Electricity Consumption by Source (1900–2014)
Kilowatts per person (kW/p) of annual net generation
Wind
Solar
Geothermal
Nuclear
Hydroelectric
Natural Gas
Petroleum & Other
Coal
Wood-biomass
Hydroelectric includes imports from Canada
kW/p
1.5
1.0
0.5
0.0
Peak 2002 310 W/p
Peak 1983 180 W/p
Peak 2012 446 W/p
Peak 2000 795 W/p
Geothermal
Nuclear
Hydroelectric
Natural Gas
Petroleum
Coal
Biomass
Wind
Solar
1900
1920
1940
1960
1980
2000
Year
©2015 Dennis Brownridge

L'électricité

Il est très important de distinguer l'énergie électrique de celle thermique, car on peut convertir l'énergie électrique à celle thermique ave une efficacité d'environ 100%

Par contre, celle thermique ne peut pas être convertie en électricité avec une efficacité supérieure à 1/3 environ, c.à d. que

100 MW thermique ⇨ 30 MW électrique,

100 MW électrique ⇨ ~ 100 MW thermique

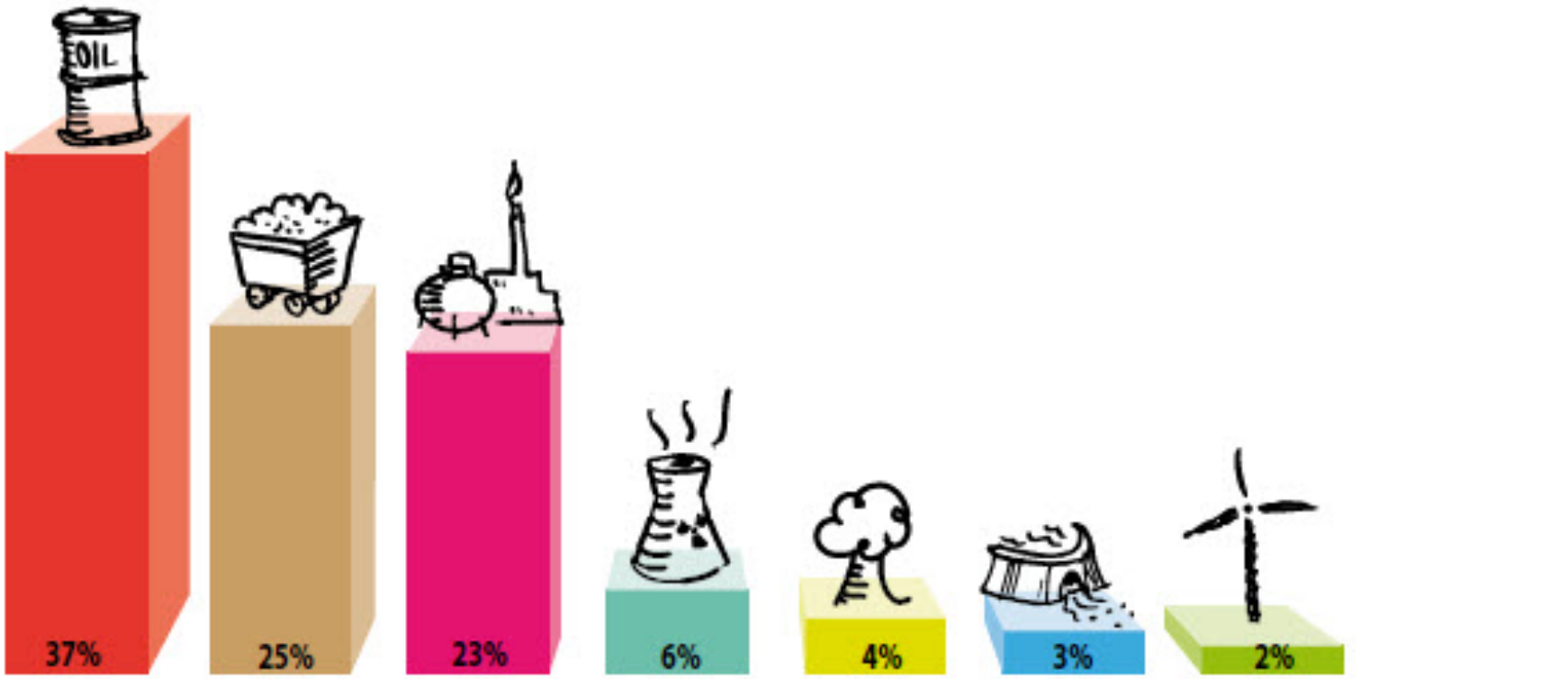
Les «renouvelables» en un clin d'œil

Source	Technologies	Types d'énergie produite
Soleil	Capteurs solaires thermiques	Eau chaude ou chaleur
Soleil	Capteurs solaires photovoltaïques	Électricité
Eau	Hydroélectricité Usines marémotrices	Électricité Électricité
Vent	Éolien	Électricité
Biomasse sèche (Bois)	Poêle ou chaudière Centrale électrique	Chauffage Électricité et chaleur
Biomasse	Biométhanisation	Électricité, chaleur, gaz
Agrocarburants	Carburants pour moteurs	Mécanique
	Centrale électrique	Électricité
Chaleur de la Terre	Géothermie	Chaleur
Chaleur du sol/de l'eau/de l'air	Pompe à chaleur	Chaleur

Les énergies renouvelables – pour et contre

Avantages	Inconvénients
• Sources propres, qui ne polluent pratiquement pas (peu d'émissions de gaz à effet de serre)	• Sources dont les performances sont irrégulières. La quantité d'énergie fournie par le vent et le soleil dépend totalement des conditions climatiques.
• Ressources qui se renouvellent assez rapidement. Elles sont inépuisables.	• Techniques encore en cours de développement. Cette filière coûte cher actuellement, mais le développement de nouvelles technologies (à plus grande échelle) et de nouveaux marchés fera baisser les prix.
• Sources qui possèdent un fort potentiel. Par exemple, l'énergie solaire reçue par la Terre représente 8 000 fois la consommation de l'humanité.	

Sources d'énergie utilisées dans le monde



PÉTROLE

CHARBON

GAZ

NUCLÉAIRE

BIOMASSE

HYDRO-ÉLECTRICITÉ

AUTRES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Solaire thermique (0,5%)
Éolien (0,3%)
Géothermie (0,2%)
Agrocarburants (0,2%)
Solaire photovoltaïque (0,04%)

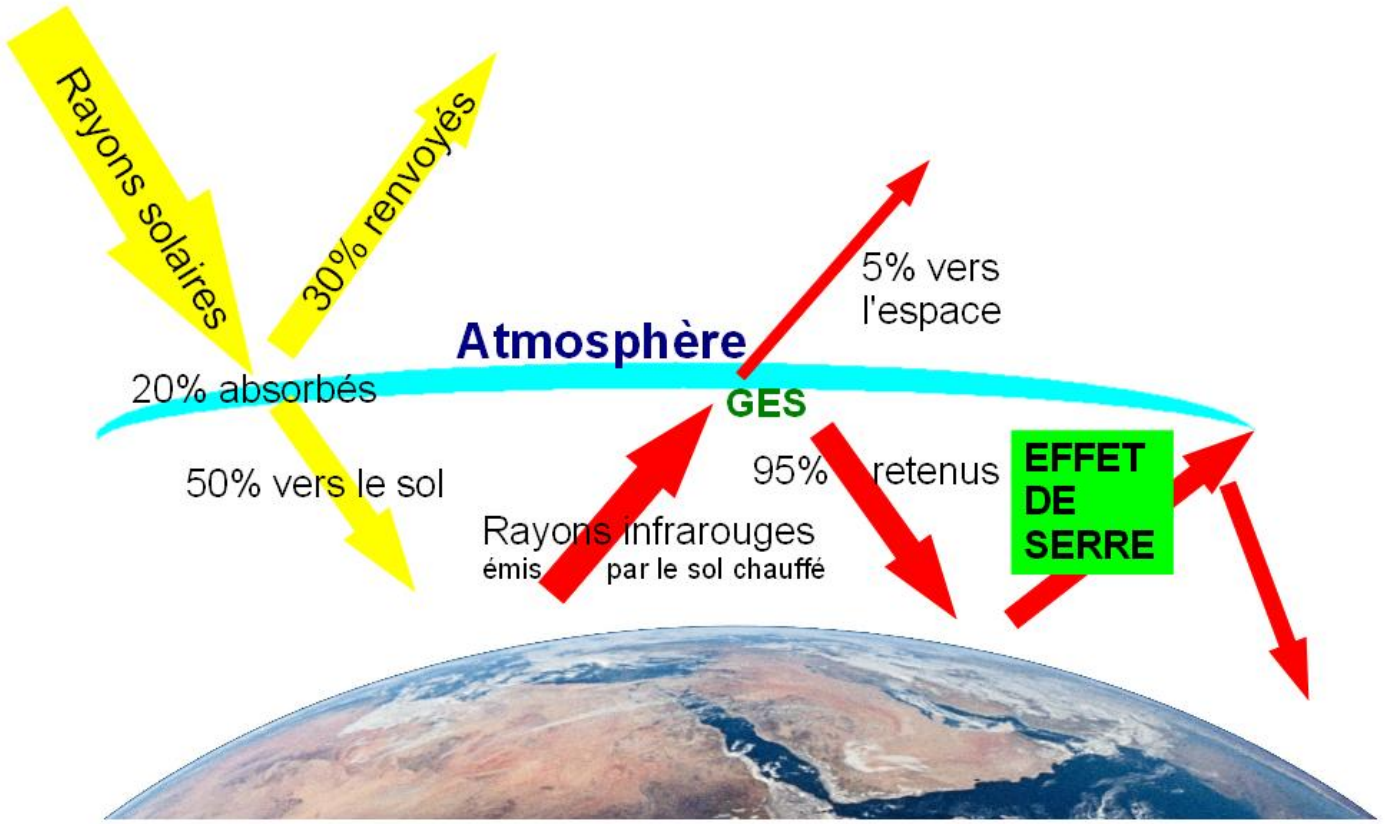
Les énergies fossiles et le bilan CO_2

- L'effet de serre signifie l'augmentation de la température de l'atmosphère à cause de la croissance de la concentration du CO_2 en partie due à la combustion des sources d'énergie fossiles: le charbon, le pétrole, le gaz naturel, la biomasse, etc.
- D'autres GES (« gaz à effet de serre ») sont le méthane (CH_4), la vapeur d'eau et le N_2O

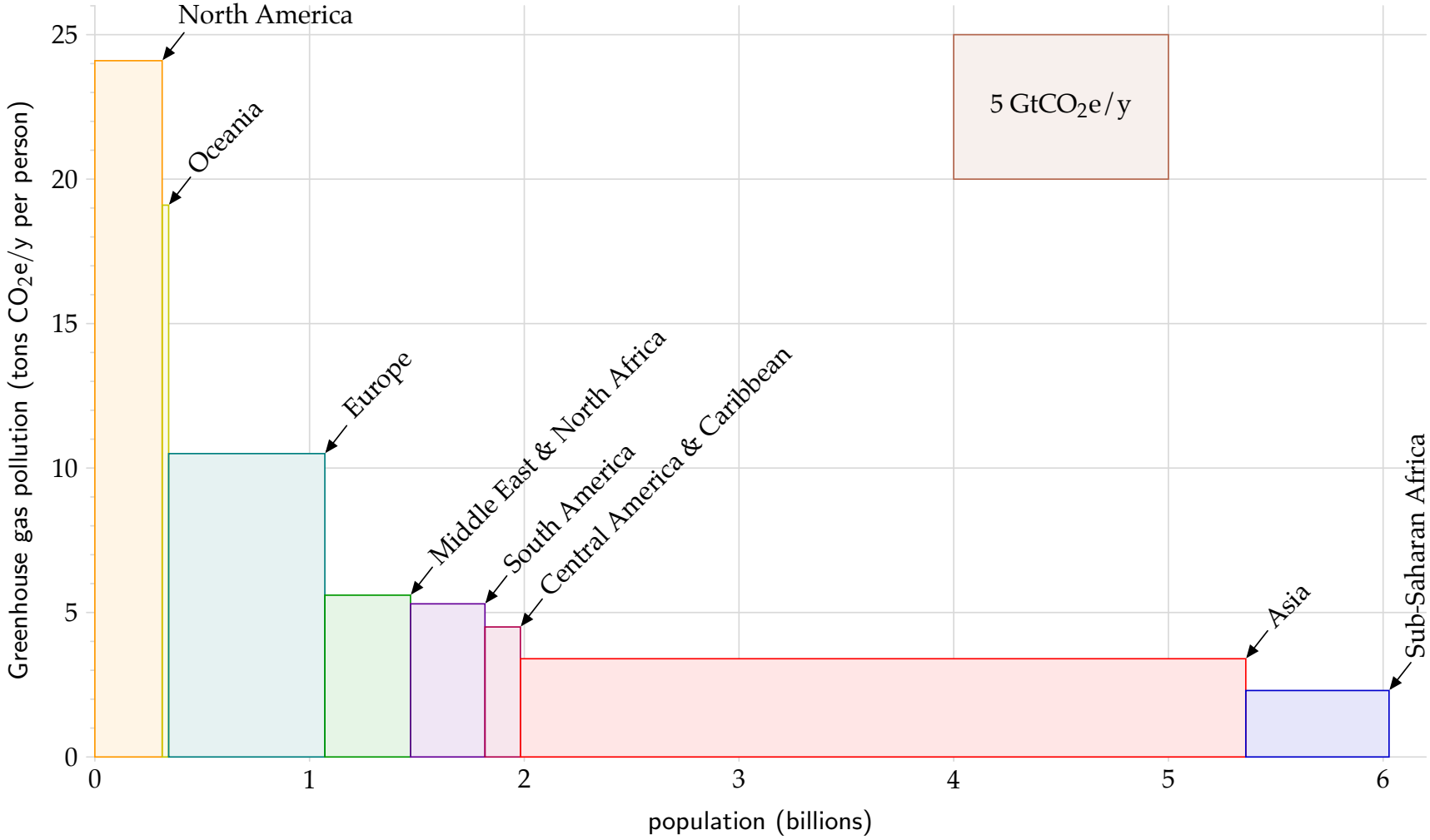
Les énergies fossiles – pour et contre

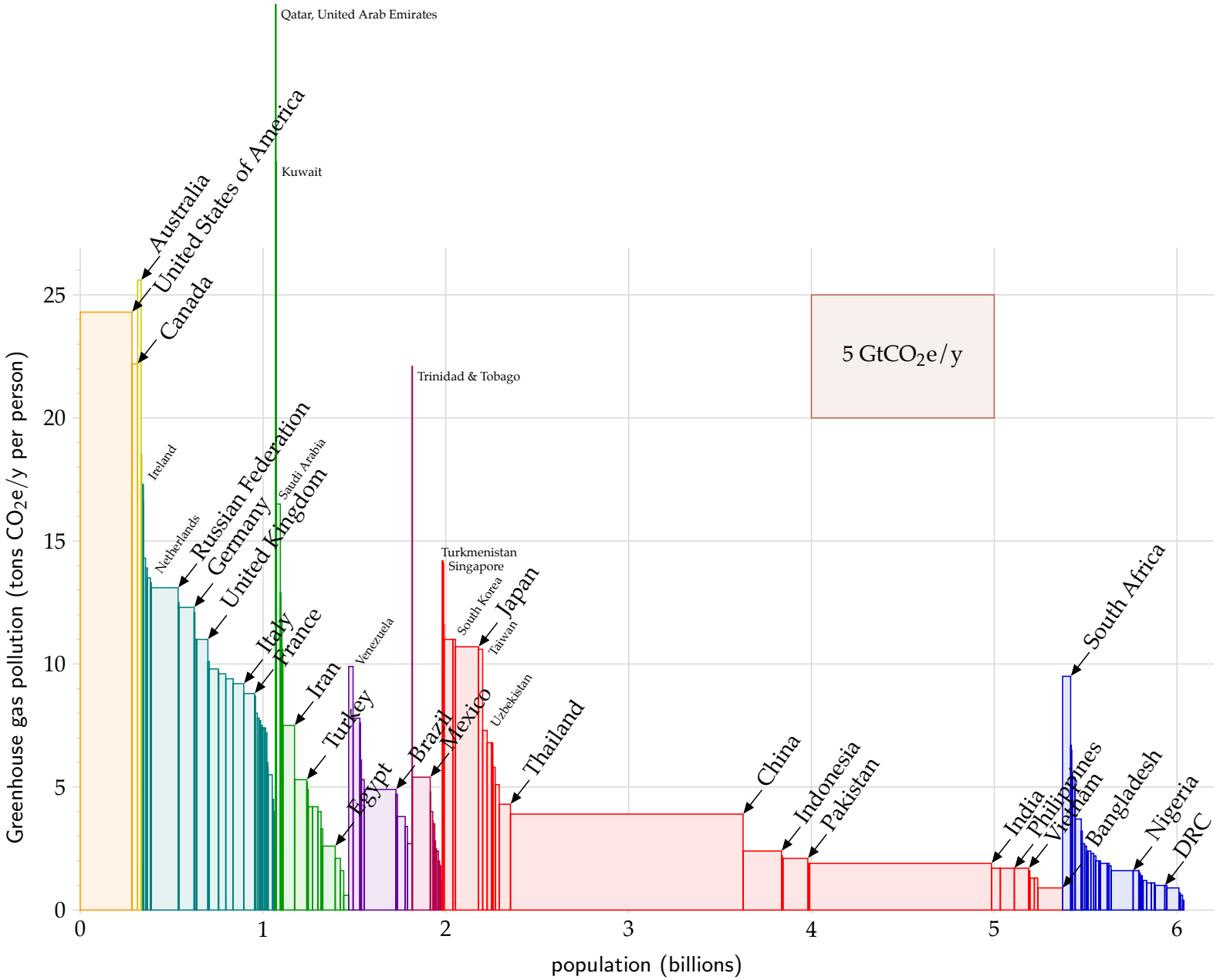
Source	Formation	Particularités	Avantages	Inconvénients
Le charbon	Se forme à partir de végétaux (fougères, arbres...) morts il y a des millions d'années.	Est une roche noire, riche en carbone.	Source disponible en grande quantité (les réserves sont estimées à ± 150 ans). Source bien répartie dans le monde.	Source fossile la plus polluante et qui produit le plus de gaz à effet de serre.
Le pétrole	Se forme à partir de planctons (animaux et végétaux microscopiques aquatiques) morts depuis des millions d'années recouverts de sédiments sans contact avec l'air.	Le pétrole « brut » est un liquide foncé. On ne l'utilise pas tel quel, il est d'abord transformé dans une raffinerie en divers produits pétroliers (fuel domestique, gazole, kérosène, essence...).	Source facilement utilisable pour des usages multiples (carburant, électricité, plastiques...)	Source limitée, dont les réserves sont estimées à ± 35 ans (2050). Source polluante à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Source mal répartie dans le monde (60 % des réserves sont concentrées dans le Moyen-Orient).
Le gaz naturel	Se forme à partir de planctons (animaux et végétaux microscopiques aquatiques) morts depuis des millions d'années recouverts de sédiments sans contact avec l'air.	Principalement composé de carbone et d'hydrogène.	Peut convenir pour des usages multiples (chauffage, électricité, industrie...). Source fossile la moins polluante (40 % d'émissions en moins que le charbon et 25 % en moins que le pétrole).	Source plus difficile à stocker en grande quantité. Source limitée, dont les réserves sont estimées à ± 60 ans (2075).

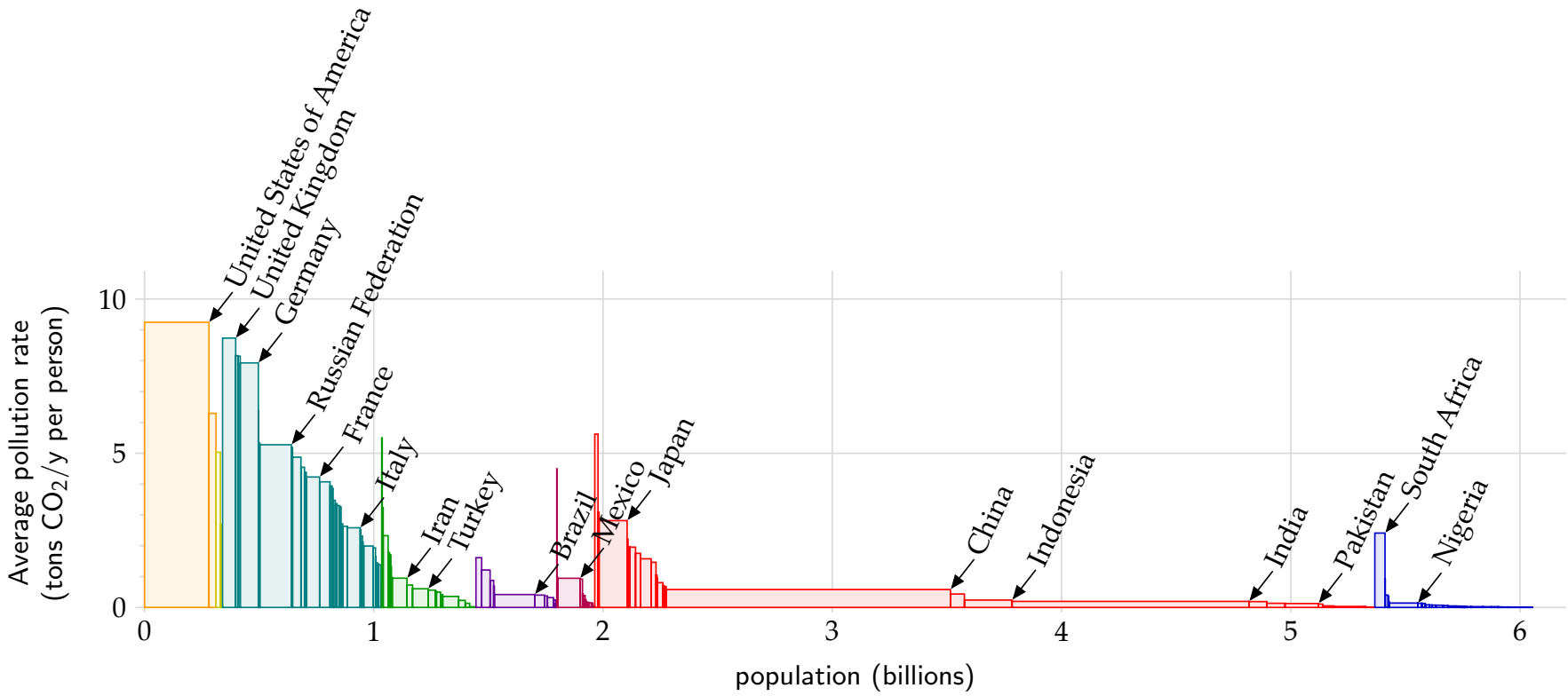
Le mécanisme de l'effet de serre (simplifié)



Pays producteurs des « gaz de serre »




Qatar, United Arab Emirates
Kuwait
Australia
United States of America
Canada
Trinidad & Tobago
Ireland
Netherlands
Russian Federation
Germany
Saudi Arabia
United Kingdom
Turkmenistan
Singapore
South Korea
Japan
Taiwan
Italy
France
Venezuela
Iran
Uzbekistan
Turkey
Egypt
Brazil
Mexico
Thailand
China
Indonesia
Pakistan
India
Philippines
Vietnam
South Africa
Bangladesh
Nigeria
DRC
5 GtCO2e/y
Greenhouse gas pollution (tons CO2e/y per person)
population (billions)
0
5
10
15
20
25
0
1
2
3
4
5
6


United States of America
United Kingdom
Germany
Russian Federation
France
Italy
Iran
Turkey
Brazil
Mexico
Japan
China
Indonesia
India
Pakistan
South Africa
Nigeria
Average pollution rate
(tons CO_2/y per person)
10
5
0
0
1
2
3
4
5
6
population (billions)

L'atmosphère terrestre

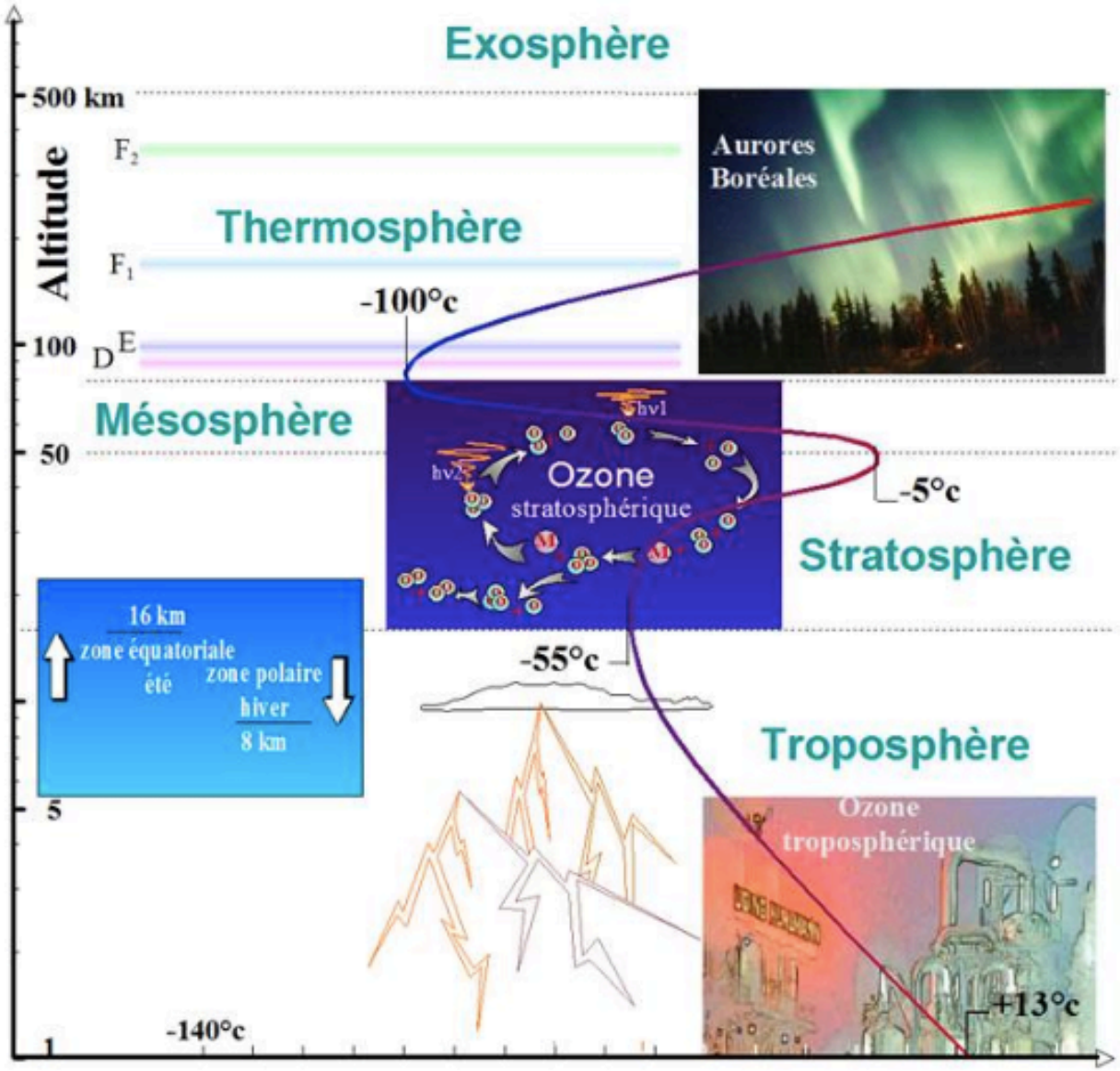
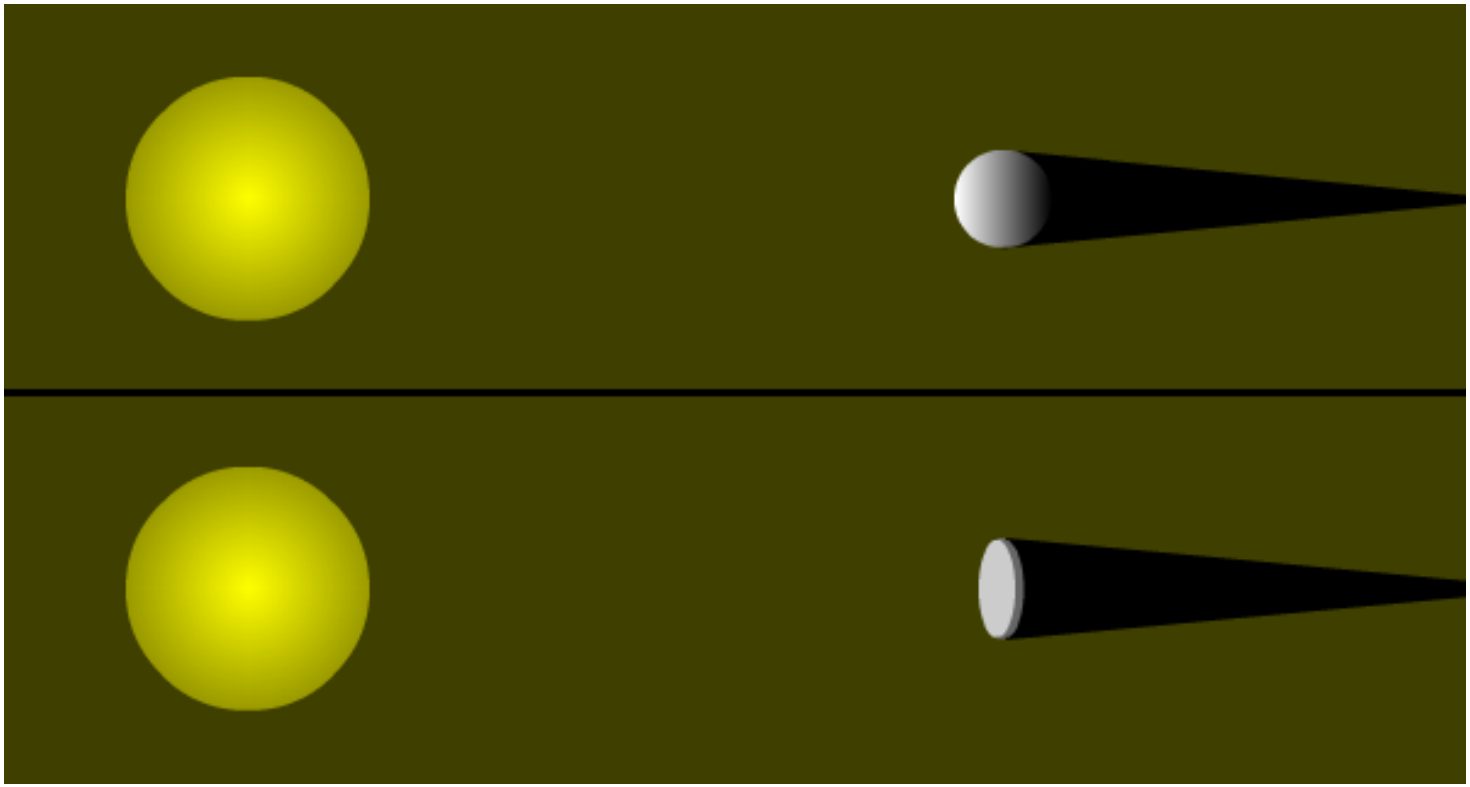


Fig. 2 : structure verticale de l'atmosphère terrestre.

L’énergie qui provient du soleil



La Terre vue du Soleil semble être un disque qui reçoit de l’énergie $E_{interceptée}$
$E_{int} = K_S \times \pi R_T^2$ où R_T est le rayon de la Terre et K_S la constante solaire = 1361 W/m^2

Donc $E_{int} = 1361 \times 3{,}1416 \times (6\ 371\ 000)^2 = 173{,}5$ Pw (= petawatts ou 10^{15} W)

Mais comme la Terre tourne, cette énergie est partagée sur toute la surface ($4\pi R_T^2$)

De plus, la Terre réfléchit une fraction de cette énergie, fraction qui s'appelle l'albédo (dont la moyenne globale pour la Terre est environ 0,31). Donc l'énergie absorbée par la Terre sera $E_{abs} = K_S \times (1 - \text{albédo}) \times \pi R_T^2$

De l'autre côté, la Terre rayonne de l'énergie dans l'espace selon la loi de Stefan-Boltzmann $J = \sigma T^4$ où J est l'énergie émise par la Terre par m^2 de surface par seconde, T est la température en degrés K et $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$, la constante de Stefan-Boltzmann. L'énergie émise par la Terre sera donc $E_{ém} = \sigma T^4 \times 4\pi R_T^2$

À l'équilibre, $E_{abs} = E_{ém}$ c.à d. que $K_S \times (1 - \text{albédo}) \times \pi R_T^2 = \sigma T^4 \times 4\pi R_T^2$ ce qui donne $K_S \times (1 - \text{albédo}) = 4\sigma T^4$ et la température à l'équilibre sera

$$T = \sqrt[4]{\frac{1361 \times (1 - 0{,}31)}{4 \times 5{,}67 \times 10^{-8}}}$$

= 253,7 K ou -19,5 °C ! (La valeur acceptée est ~ 14 °C)

La différence est attribuable à l'effet de serre. Une partie de l'énergie qui normalement serait réfléchie vers l'espace est retenue par certains « gaz à effet de serre » qui ont une forte absorption dans l'infrarouge.

Raies d'absorption atmosphérique

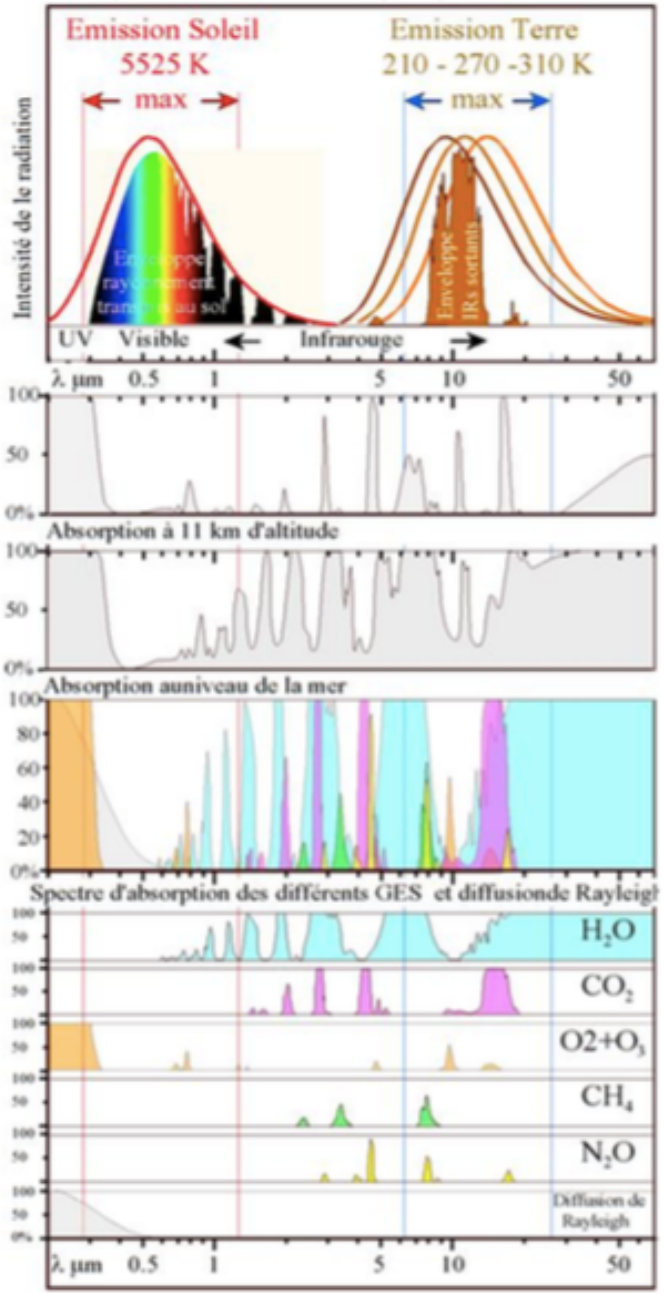
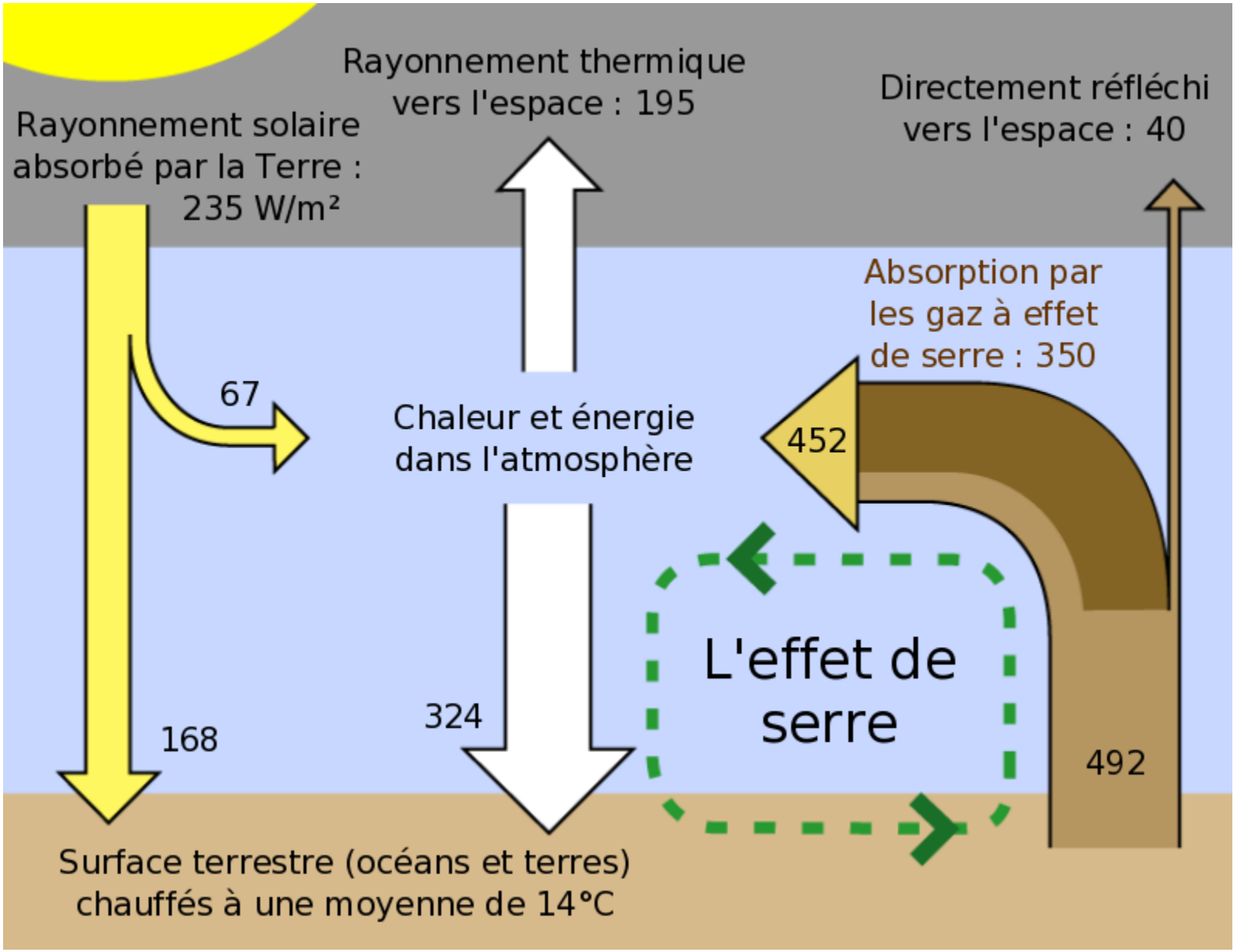


Fig. 5a : spectre des raies d'absorption des gaz atmosphériques.
Limites rouges : le domaine des l courtes reçues du Soleil
Limites bleues : le domaine des l longues émises par la terre


Rayonnement thermique
vers l'espace : 195
Directement réfléchi
vers l'espace : 40
Rayonnement solaire
absorbé par la Terre :
235 W/m²
Absorption par
les gaz à effet
de serre : 350
67
Chaleur et énergie
dans l'atmosphère
452
L'effet de
serre
324
168
492
Surface terrestre (océans et terres)
chauffés à une moyenne de 14°C

Le bilan énergétique de la Terre

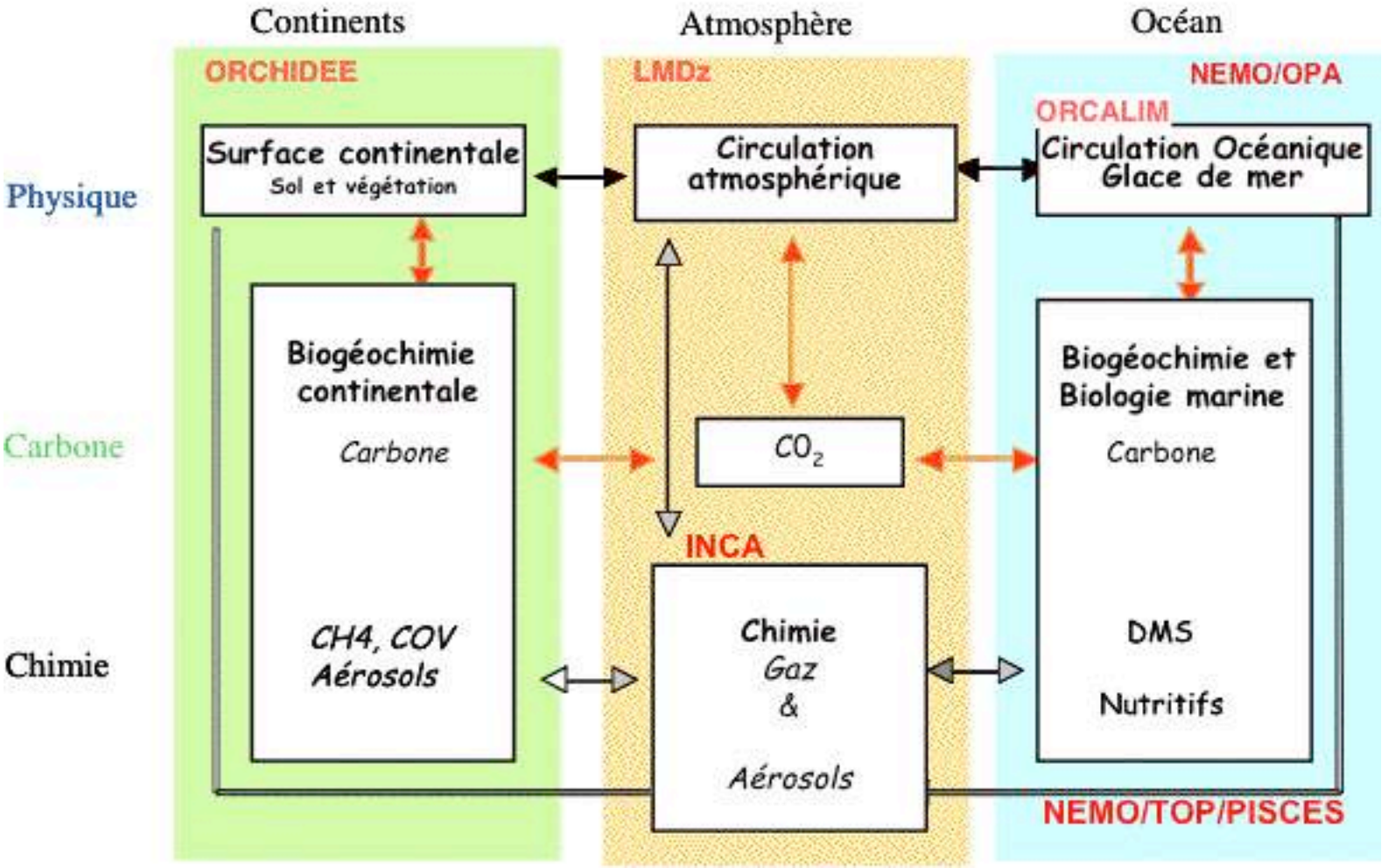
De toute l'énergie qui est incidente sur la Terre

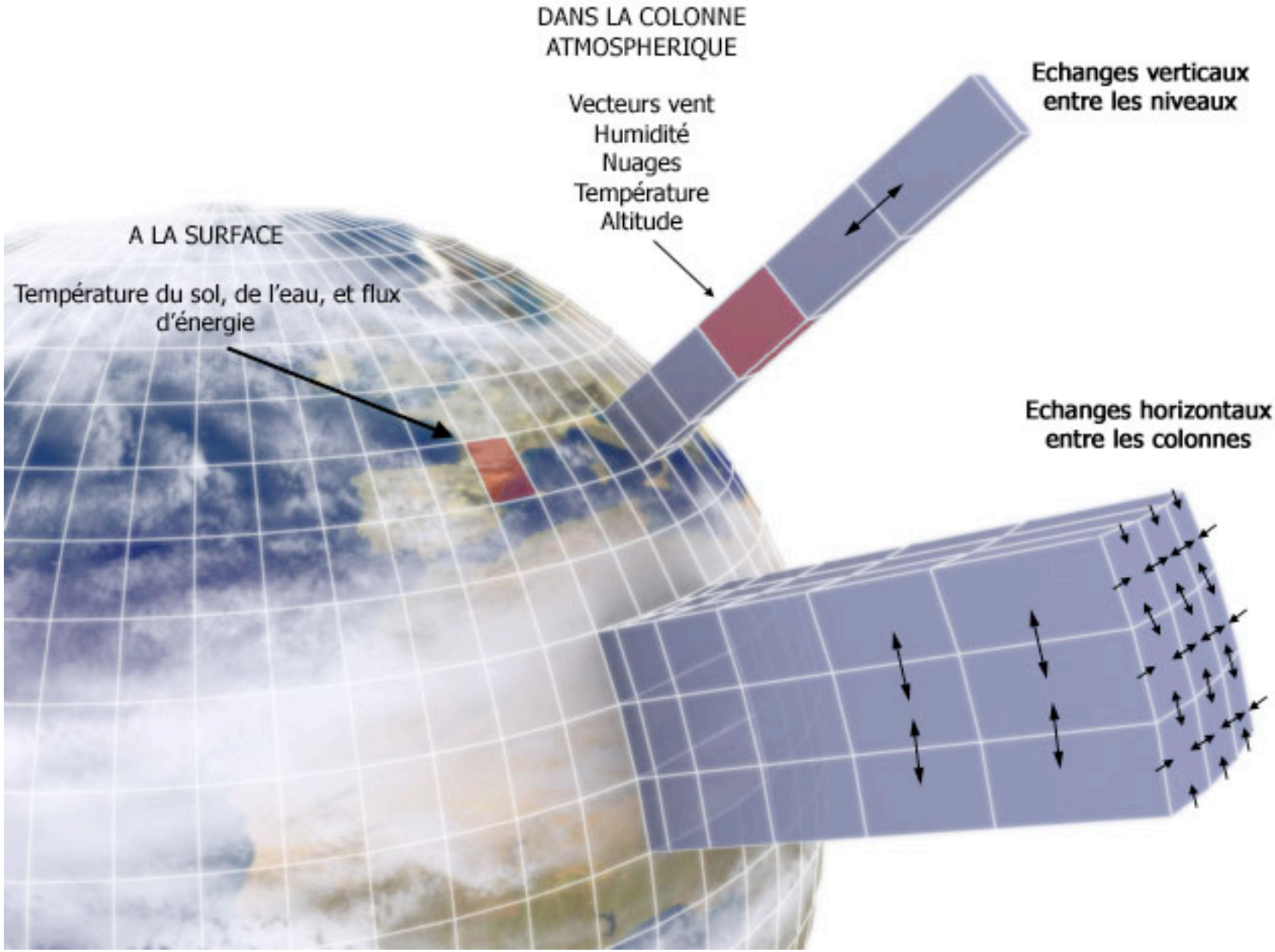
- 6% est réfléchie par l'atmosphère
- 16% est absorbée par l'atmosphère
- 20% est réfléchie par les nuages
- 3% est absorbée par les nuage
- 51% est absorbée par les océans et la Terre

De l'énergie absorbée par la Terre, l'atmosphère et les nuages

- 64% est retournée à l'espace (atmosphère et nuages)
- 6% est retournée à l'espace directement de la surface
- 7% est dissipée dans le mouvement de l'air
- 23% est consommée dans l'évaporation de l'eau à la surface

Le modèle climat IPSL



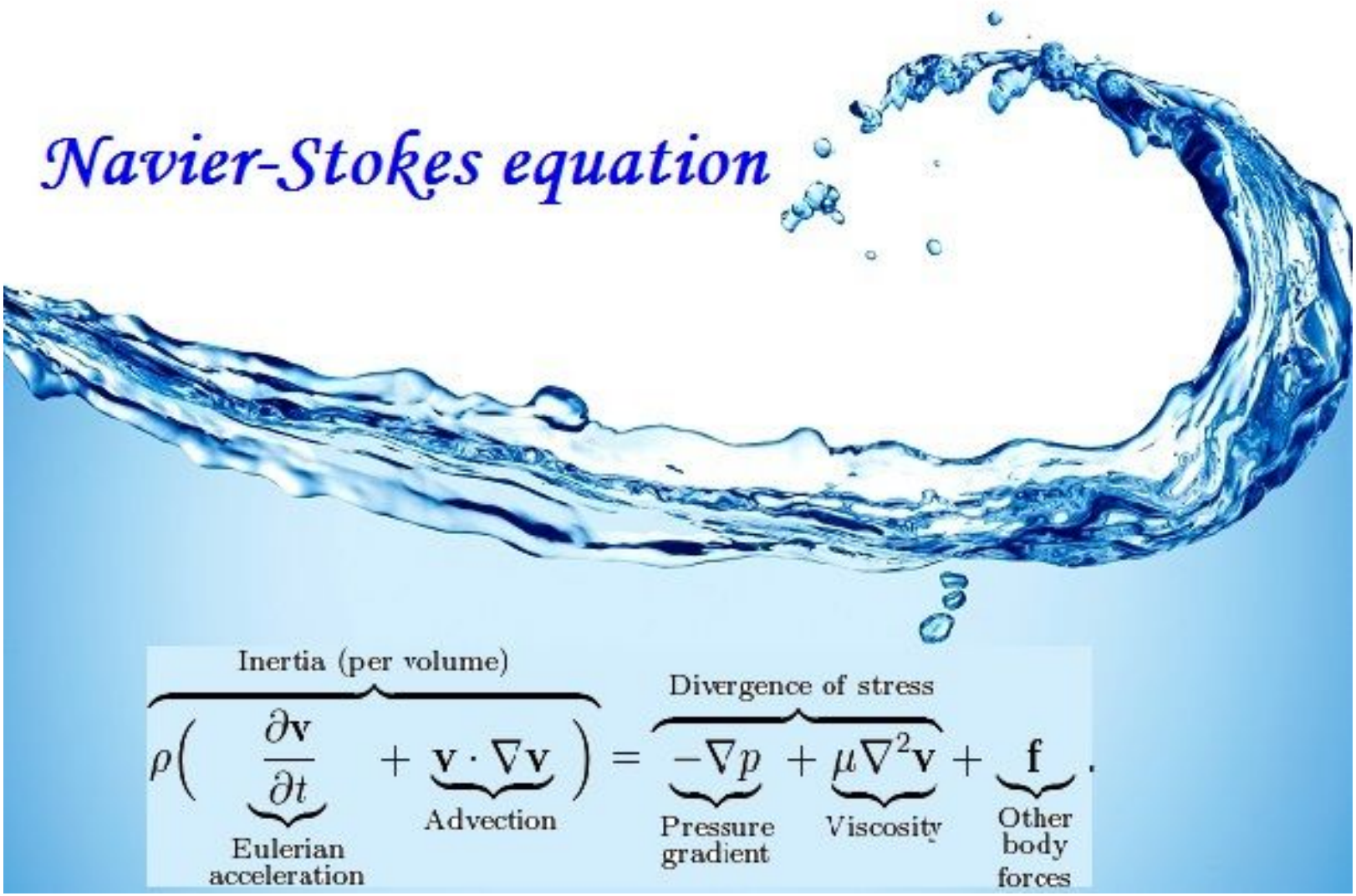

DANS LA COLONNE
ATMOSPHERIQUE
Vecteurs vent
Humidité
Nuages
Température
Altitude
Echanges verticaux
entre les niveaux
A LA SURFACE
Température du sol, de l'eau, et flux
d'énergie
Echanges horizontaux
entre les colonnes

Température moyenne globale – existe-t-elle?

Que signifie la notion de température moyenne car la Terre n'est pas un milieu homogène? Et est-ce qu'on veut dire moyenne arithmétique ou géométrique ou autre? Ce sont plutôt les différences de température entre une région et une autre qui sont responsables pour le climat (ouragans, courants océaniques etc.)

C. Essex, R. McKitrick, B. Andresen « Does a Global Temperature Exist? » J. Non-Equil. Thermodynamics 32 (2007) 1-27.

Une bonne partie d'un modèle climatique exige la solution de l'équation Navier-Stokes



$$\frac{d}{dt}S_q[f]=\int d\mathbf{z}\ \left\{\frac{\delta S_q[f]}{\delta f(z)}\right\}\frac{\partial f(\mathbf{z})}{\partial t}$$

$$=\frac{k_B}{q-1}\int d\mathbf{z}\ \left\{1-q[f(\mathbf{z})]^{q-1}\right\}\frac{\partial f(\mathbf{z})}{\partial t}$$

$$=\frac{k_B}{q-1}\int d\mathbf{z}\ \left\{\frac{1}{q[f(\mathbf{z})]^{q-1}}-1\right\}\frac{\partial}{\partial t}[f(\mathbf{z})]^q$$

$$=\frac{k_B}{q-1}\int d\mathbf{z}\ \left\{\frac{1}{q[f(\mathbf{z})]^{q-1}}-1\right\}\left(\frac{\partial}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla\right)[f(\mathbf{z})]^q$$

$$=-\frac{k_B}{(q-1)\tau}\int d\mathbf{z}\ \left\{\frac{1}{q[f(\mathbf{z})]^{q-1}}-1\right\}\left\{[f(\mathbf{z})]^q-[f^{(0)}(\mathbf{z})]^q\right\}$$

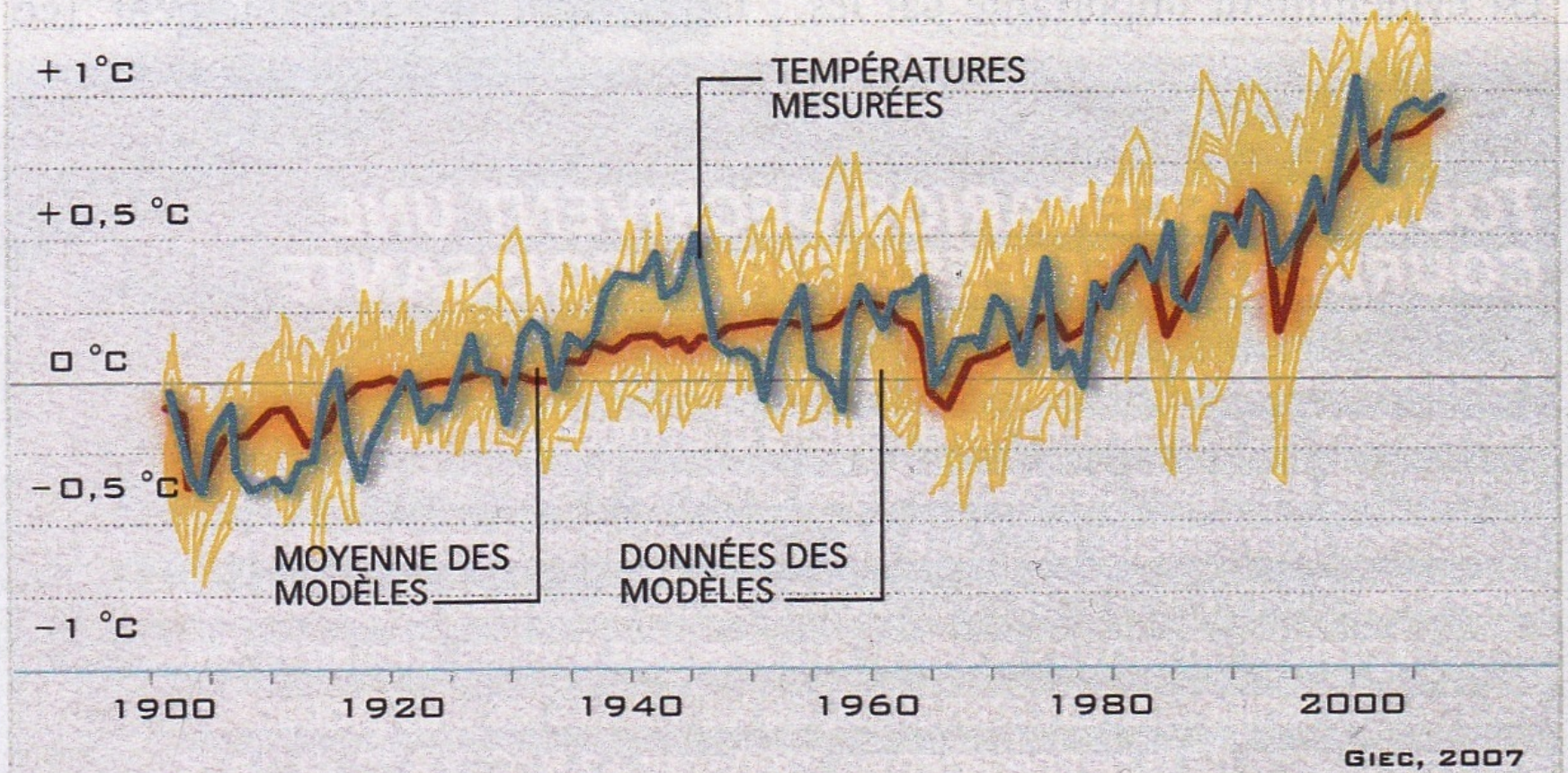
$$=\frac{S_q\left[f^{(0)}\right]-S_q[f]}{\tau}+\frac{k_B}{(q-1)\tau}\int d\mathbf{z}\left\{\left[f(\mathbf{z})-f^{(0)}(\mathbf{z})\right]-\frac{[f(\mathbf{z})]^q-[f^{(0)}(\mathbf{z})]^q}{q[f(\mathbf{z})]^{q-1}}\right\}$$

$$=\frac{S_q\left[f^{(0)}\right]-S_q[f]}{\tau}+\frac{k_B}{(q-1)\tau}\int d\mathbf{z}\ f^{(0)}(\mathbf{z})\left\{\left[g(\mathbf{z})-1\right]-\frac{[g(\mathbf{z})]^q-1}{q[g(\mathbf{z})]^{q-1}}\right\}$$

$$=\frac{S_q\left[f^{(0)}\right]-S_q[f]}{\tau}+\frac{k_B}{\tau}\int d\mathbf{z}\ f^{(0)}(\mathbf{z})\Phi_q(g(\mathbf{z})), \qquad (39)$$

La fiabilité des modèles est testée sur les observations passées

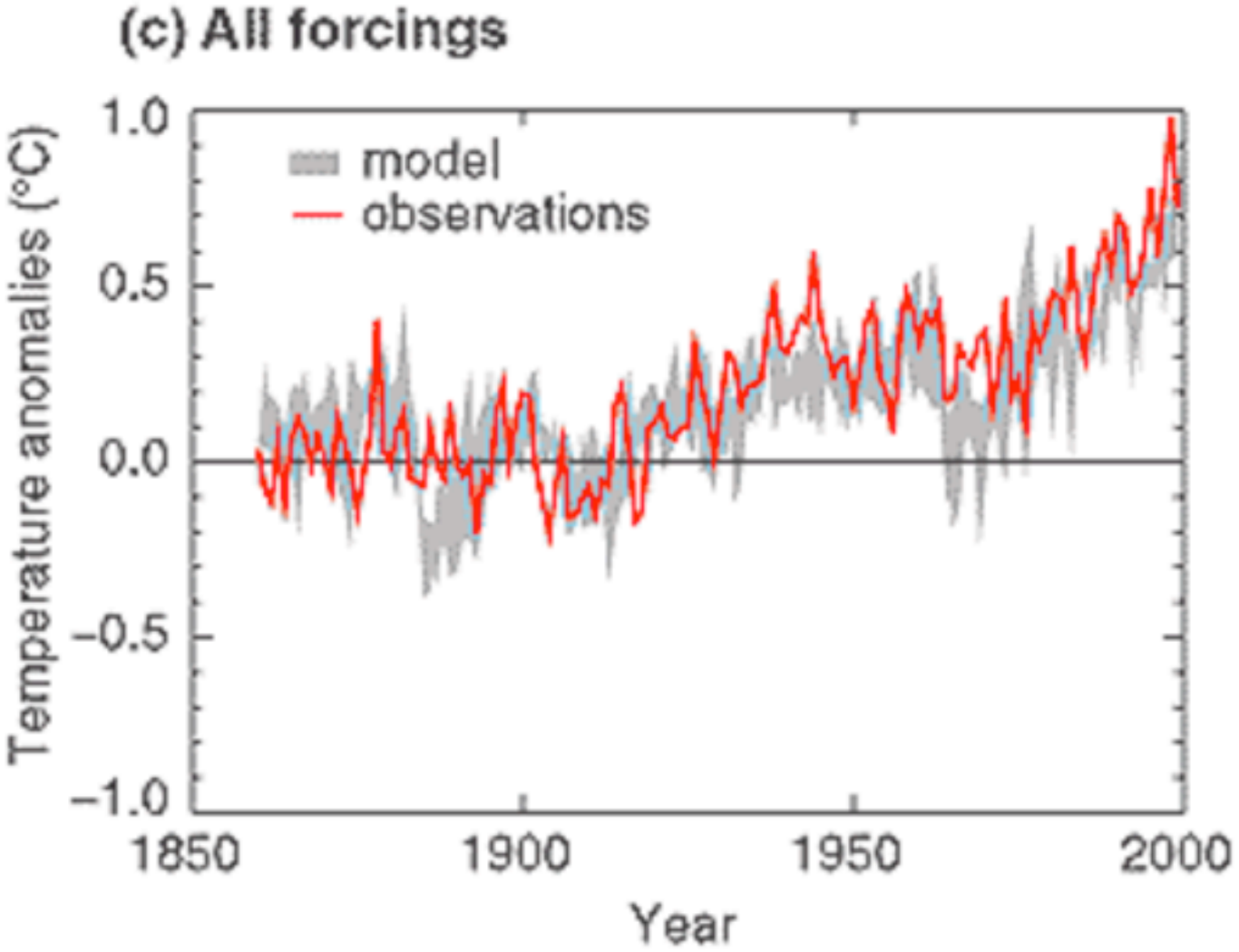
Entre observations (en bleu) et modélisations (en rouge), on constate que les représentations de l'écart des températures par rapport à la moyenne 1901-1950 concordent.



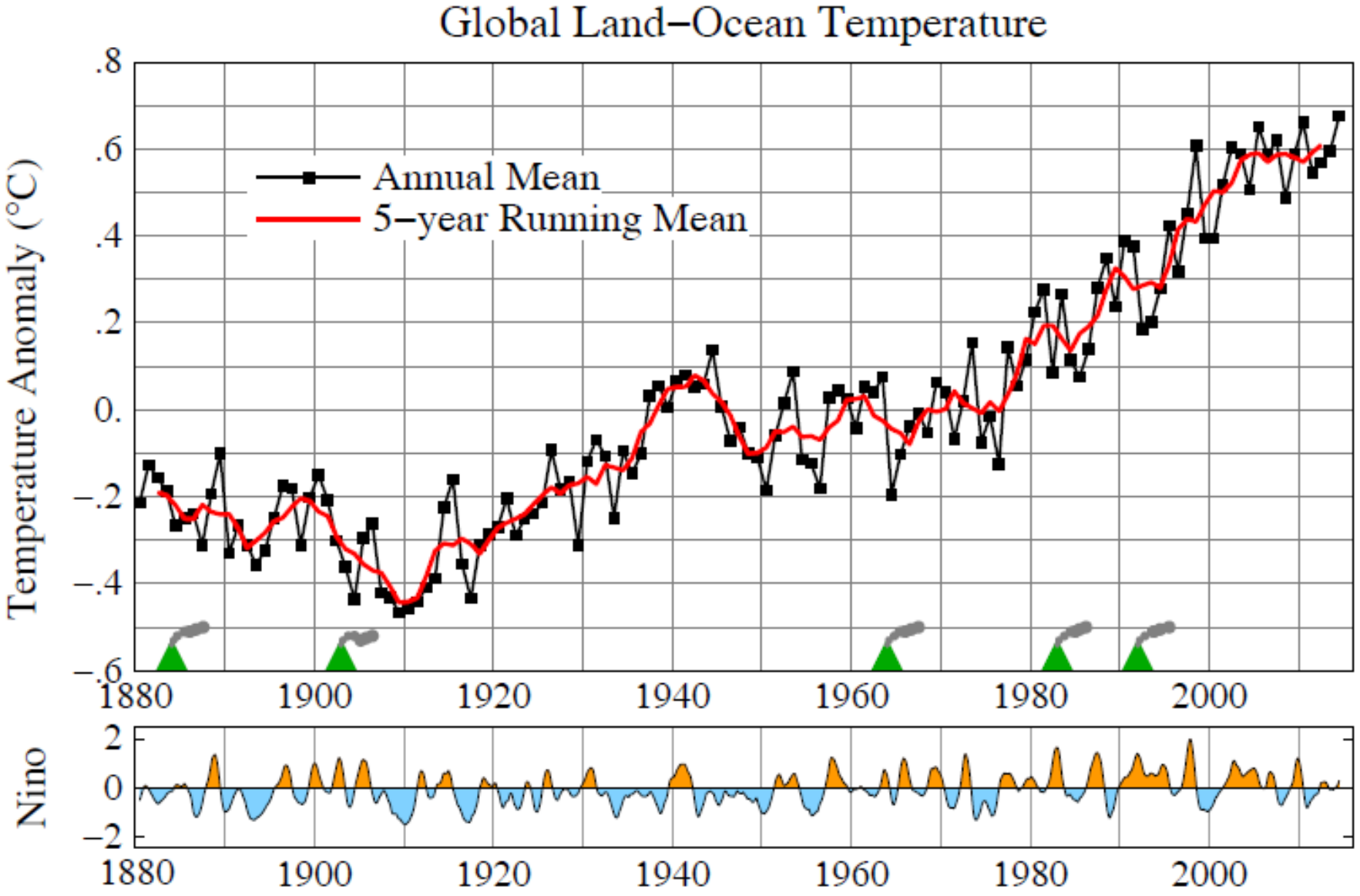
Les 23 modèles pris en compte par le Giec

Modèle	Taille des mailles océaniques	Taille des mailles atmosphériques	Principaux paramètres autres que gaz à effet de serre et soufre	Prévisions pour 2100
BCC-CM1, Chine	1,9°x1,9°	1,9°x1,9°	Volcans, végétation, rayonnement solaire	+ 3 °C
BCCR-BCM2.0, Norvège	de 0,5° à 1,5°x1,5°	1,9°x1,9°	Poussières, embruns, végétation, rayonnement solaire	-
CCSM3, Etats-Unis	de 0,3° à 1°x1°	1,4°x1,4°	Suies, volcans, poussières, embruns, rayonnement solaire	+ 2,7 °C
CGCM3.1(T47), Canada	1,9°x1,9°	2,8°x2,8°	Poussières, volcans, embruns, végétation, rayonnement solaire	+ 2,6 °C
CGCM3.1(T63), Canada	0,9°x1,4°	1,9°x1,9°	Poussières, volcans, embruns, végétation, rayonnement solaire	+ 3,2 °C
CNRM-CM3, France	de 0,5° à 2°x2°	1,9°x1,9°	Poussières, embruns	+ 2,9 °C
CSIRO-MK3.0, Australie	0,8°x1,9°	1,9°x1,9°	-	+ 2,5 °C
ECHAM5/MPI-OM, Allemagne	1,5°x1,5°	1,9°x1,9°	-	+ 3,4 °C
ECHO-G, Allemagne/Corée	de 0,5° à 2,8°x2,8°	3,9°x3,9°	Volcans, rayonnement solaire	+ 2,8 °C
FGOALS-g1.0, Chine	1°x1°	2,8°x2,8°	Rayonnement solaire	-
GFDL-CM2.0, Etats-Unis	de 0,3° à 1°x1°	2°x2,5°	Suies, volcans, poussières, embruns, rayonnement solaire	+ 2,7 °C
GFDL-CM2.1, Etats-Unis	de 0,3° à 1°x1°	2°x2,5°	Suies, volcans, poussières, embruns, végétation, ray. solaire	+ 2,1 °C
GISS-AOM, Etats-Unis	3°x4°	3°x4°	Embruns	+ 2 °C
GISS-EH, Etats-Unis	2°x2°	4°x5°	Suies, volcans, nitrates, poussières, embruns, végétation, rayonnement solaire	+ 2,3 °C
GISS-ER, Etats-Unis	4°x5°	4°x5°	Suie, nitrates, poussière, volcans, embruns, végétation, rayonnement solaire	+ 2,2 °C
INM-CM3.0, Russie	2°x2.5°	4°x5°	Volcans, rayonnement solaire	+ 2,6 °C
IPSL-CM4, France	2°x2°	2,5°x3,75°	-	+ 3,3 °C
MIROC3.2(H), Japon	0,2°x0,3°	1,1°x1,1°	Suies, poussières, volcans, embruns, végétation, ray. solaire	+ 5 °C
MIROC3,2 (M), Japon	de 0,5° à 1,4°x1,4°	2,8°x2,8°	Suie, volcans, poussière, embruns, végétation, ray. solaire	+ 3,4 °C
MRI-CGCM2.3.2, Japon	de 0,5° à 2°x2,5°	2,8°x2,8°	Volcans, rayonnement solaire	+ 2,4 °C
PCM, Etats-Unis	de 0,5° à 0,7°x1,1°	2,8°x2,8°	Volcans, rayonnement solaire	+ 2,1 °C
UKMO-HadCM3, Royaume-Uni	1,25°x1,25°	2,4°x3,75°	Volcans, rayonnement solaire	+ 2,9 °C
UKMO-HadGEM1, Royaume-U	de 0,3° à 1°x1°	1,3°x1,9°	Suies, volcans, embruns, rayonnement solaire	+ 3,6 °C

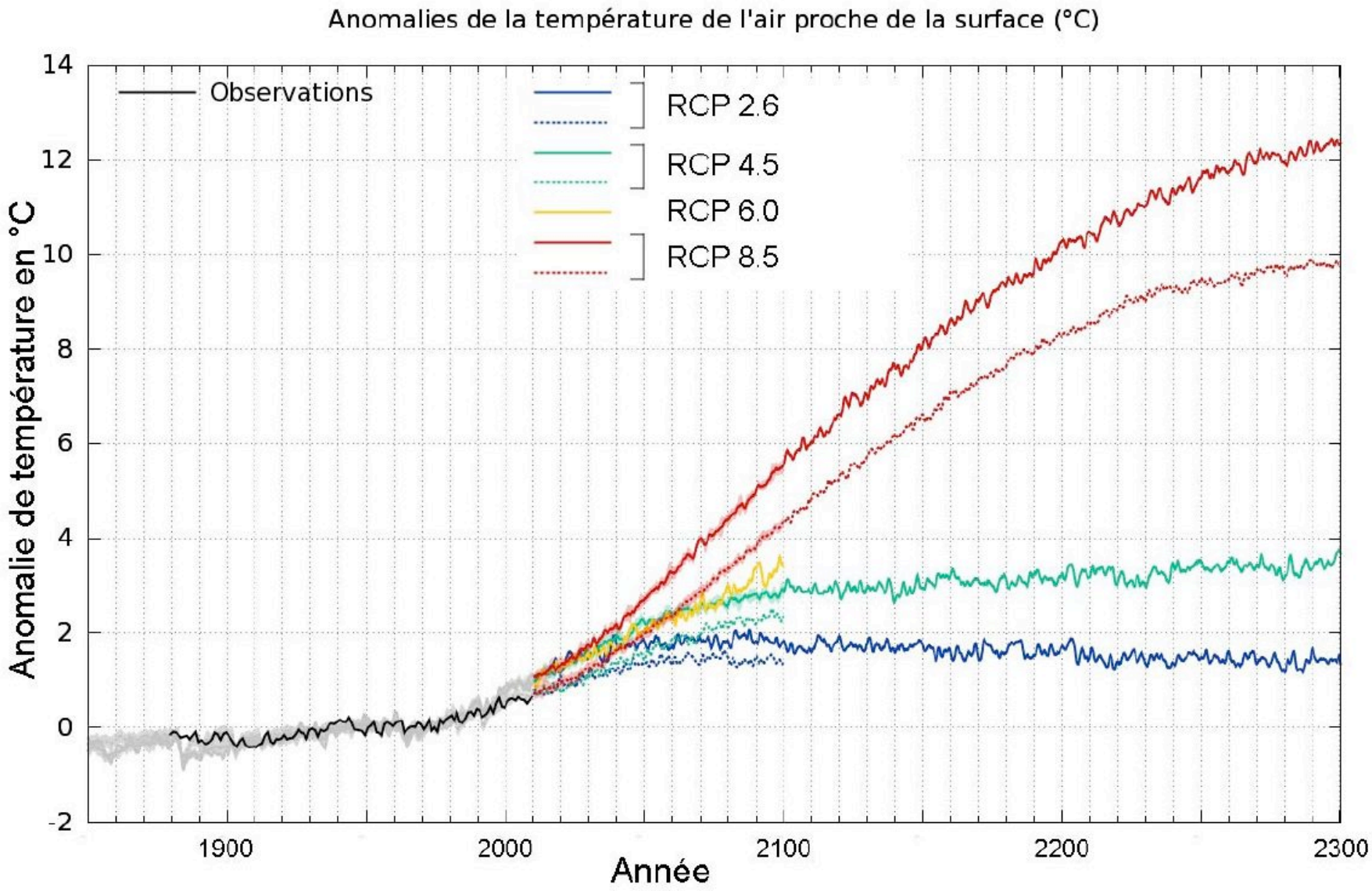
Une comparaison entre un modère et les mesures (jusqu'en 2000)



Influence possible de El Niño?

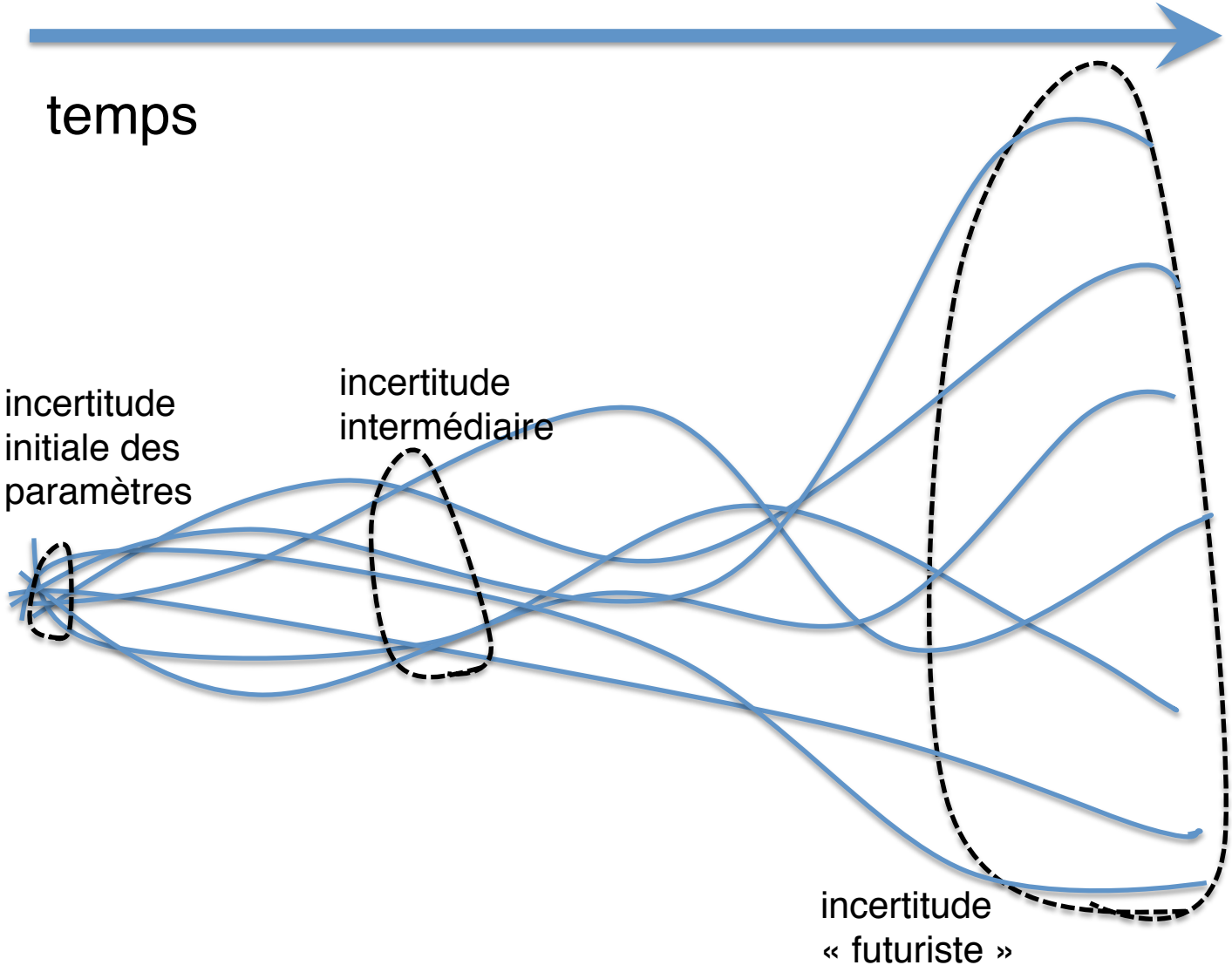


Des prédictions (courageuses!) de l'anomalie de la température sur plusieurs siècles



« Les prédictions sont toujours risquées, encore plus quand elles concernent l'avenir »

- souvent attribué au physicien danois Niels Bohr, qui a créé le modèle atomique moderne


temps
incertitude
initiale des
paramètres
incertitude
intermédiaire
incertitude
« futuriste »

$F = F_0 + \Delta F$ Global energy budget, flux integer tables and the greenhouse effect of clouds $F_0 = I \times UNIT$

GREENHOUSE METRICS UNITS

G(all) – G(clear)	= OLR(clear) – OLR(all)	= LWCRE	≡ 1 UNIT = 26.6 Wm^{-2}	⇨ ULW = 15	OLR(clear) = 10	G(clear) = 5
G(cloudy) – G(clear)	= OLR(clear) – OLR(cloudy)	= LWCRE / β_0	≡ 1 UNIT = 44.33 Wm^{-2}	⇨ ULW = 9	OLR(clear) = 6	G(clear) = 3
1 / f_0(all) = 1 ;	1 / f_0(clear) = 1	= STI(clear)	≡ 1 UNIT = 66.5 Wm^{-2}	⇨ ULW = 6	OLR(clear) = 4	G(clear) = 2

F_0 RELATIONSHIPS

- E(SFC, all) = 2OLR(all) + LWCRE = 2OLR(clear) – STI(all)

E(SFC, cloudy) = OLR(cloudy) + OLR(clear)

E(SFC, clear) = 2 OLR(clear)

- Solar absorbed by surface serves the energy content of the all-sky greenhouse effect.
- The cloud-covered part of the surface radiates as much energy as in the outgoing longwave radiation: ULW × β = OLR(all)
- 'Cooling to space':

All-sky: LWQ + CTS(atm) = 0, LWQ + CTS(all) = LWCRE.

Cloudy sky: β × [LWQ + CTS(atm, cloudy)] = –LWCRE /5

Clear-sky: (1 – β) × [LWQ + CTS(clear)] = LWCRE / 5

- The effective LW-opaque single-layer cloud area fraction is equal to the all-sky transfer function, f_0(all) = β_0, and f_0(all) × f_0(clear) = g_0(all).
- Clouds cool the surface in the SW, warm it in the LW. The warming effect, LWCRE, is compensated by an equivalent amount of energy being lost in the open atmospheric window: LWCRE = (1 – β) × STI(clear).
- A 'grid' albedo position is $\alpha_0 = 1 - \sqrt{2}/2$
- F observed data ⇨
- Their sources ⇨

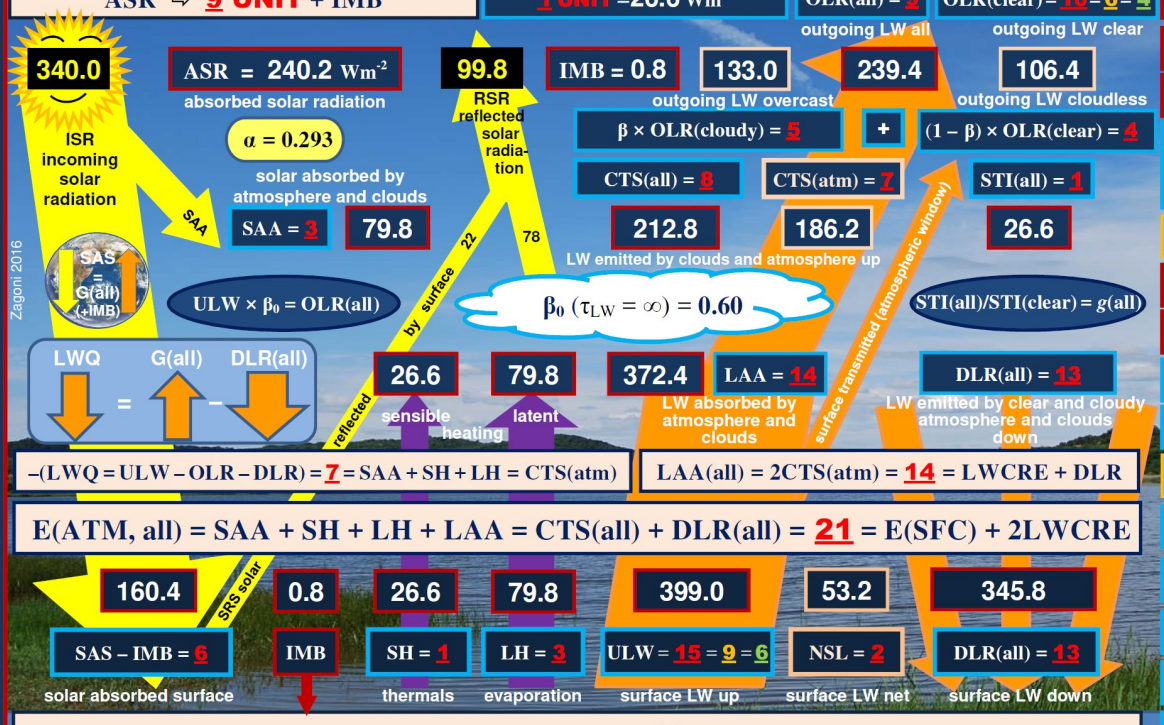
ASR ⇨ 9 UNIT + IMB

1 UNIT = 26.6 Wm^{-2}

OLR(all) = 9 outgoing LW all

OLR(clear) = 10 = 6 = 4 outgoing LW clear

OLR(clear) = 266.0



–(LWQ = ULW – OLR – DLR) = 7 = SAA + SH + LH = CTS(atm)

LAA(all) = 2CTS(atm) = 14 = LWCRE + DLR

E(ATM, all) = SAA + SH + LH + LAA = CTS(all) + DLR(all) = 21 = E(SFC) + 2LWCRE

E(SFC, all) = SAS + DLR = SH + LH + ULW + IMB = 19 + IMB = 2OLR(all) + LWCRE + IMB

CLEAR-SKY WEIGHTED CONTRIBUTION

f(clear) = OLR(clear) / ULW = 2/3 ⇨ STI(clear) = 1; G(clear) = 2; CTS(clear) = 3; OLR(clear) = 4; LAA(clear) = 5; ULW = 6

(1–β) × G(clear) = 2; (1–β) × CTS(clear) = 3; (1–β)×OLR(clear) = 4; (1–β) × LAA(clear)=G(clear) = 5; (1 – β) × ULW = G(all) = 6

LWQ + CTS(clear) = LWCRE / 2 = + 13.3 Wm^{-2}; (1–β) × [LWQ + CTS(clear)] = LWCRE / 5 = 1 / 5 = + 5.32 Wm^{-2}

CLOUDY WEIGHTED CONTRIBUTION

f(cloudy) = OLR(cloudy)/ULW = 5/9 ⇨ G(clear) = 3; CTS(atm, cloudy)= G(cloudy)= 4; OLR(cloudy)= 5; OLR(clear)= 6; ULW = 9

β × G(cloudy) = 4 ; β × CTS(atm, cloudy) = 4 ; β × OLR(cloudy) = 5 ; β × LAA(cloudy) = OLR(all) = 9 ; β × ULW = OLR(all) = 9

LWQ + CTS(atm, cloudy) = – LWCRE / 3 = – 8.86 Wm^{-2}; β × [LWQ + CTS(atm, cloudy)] = – LWCRE / 5 = – 1 / 5 = – 5.32 Wm^{-2}

LWQ = – 186.3 ± 6 SAS = 160.1 ± 6	SH = 25 ± 4 LH = 81 ± 4	ULW = 398.8 ± 4 OLR(all) = 239.8 ± 2	NSL = 53.5 ±5 OLR(clear) =266.4 ± 4	DLR = 345.3 ± 5 STI(clear) = 66 ± 2	β = 0.605 ± 0.01 g(clear) = 1/3
CERES EBAF Ed2.7 Wild et al. 2015	L'Ecuyer et al. 2015	CERES EBAF Ed2.7 Wild et al. 2015		CERES EBAF Ed2.7 Costa and Shine 2012	CERES SYN1deg Ed3A Ramanathan-Inamdar 2006

Integer tables of Earth's energy flows.
F_0 values in unit flux:

ALL-SKY: 26.6 Wm^{-2}

STI(all)	= 1 = 26.6
LWCRE	= 1 = 26.6
SH	= 1 = 26.6
NSL(all)	= 2 = 53.2
LH	= 3 = 79.8
SAA(all)	= 3 = 79.8
G(clear)	= 5 = 133.0
G(all)	= 6 = 159.6
SAS(all)	= 6 = 159.6
–LWQ	= 7 = 186.2
CTS(atm)	= 7 = 186.2
CTS(all)	= 8 = 212.8
OLR(all)	= 9 = 239.4
OLR(clear)	= 10 = 266.0
DLR(clear)	= 12 = 319.2
DLR(all)	= 13 = 345.8
LAA(all)	= 14 = 372.4
ULW	= 15 = 399.0

CLOUDY: 44.33 Wm^{-2}

STI(cloudy)	= 0
LWCRE / β_0	= 1 = 44.33
(SH+LH)(cloudy)	= 2 = 88.66
G(clear)	= 3 = 133.0
G(cloudy)	= 4 = 177.33
CTS(atm, cloudy)	= 4 = 177.33
CTS(all, cloudy)	= 5 = 221.66
OLR(cloudy)	= 5 = 221.66
OLR(clear)	= 6 = 266.0
LAA(cloudy)	= 9 = 399.0
ULW	= 9 = 399.0

CLEAR-SKY: 66.5 Wm^{-2}

STI(clear)	= 1 = 66.5
(SH + LH)(clear)	= 2 = 133.0
G(clear)	= 2 = 133.0
CTS(clear)	= 3 = 199.5
OLR(clear)	= 4 = 266.0
LAA(clear)	= 5 = 332.5
ULW	= 6 = 399.0

$\Delta F < \pm 1\sigma$

G(clear) = 133.0

CTS(clear) = 199.5

STI(clear) = 66.5

CTS(clear)/ULW=1/2

STI(clear)/ULW=1/6

G ≡ ULW – OLR

G(all) = 159.6

G(clear) = 5 = 3 = 2

G(all) = 6

$g \equiv G / ULW$
$f \equiv OLR / ULW$

g_0(clear) = 1/3

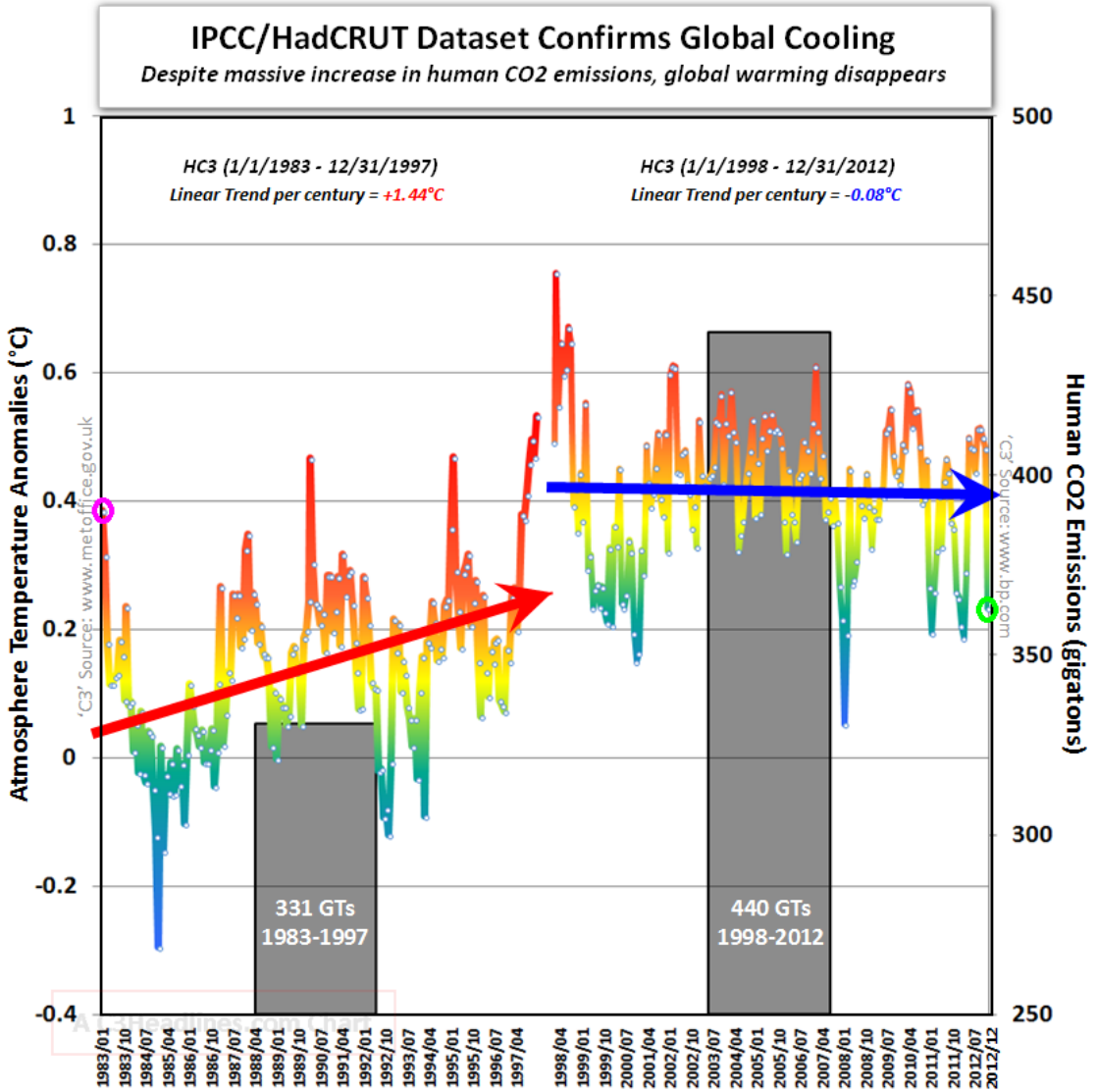
g_0(all) = 2/5

f_0(clear) = 2/3

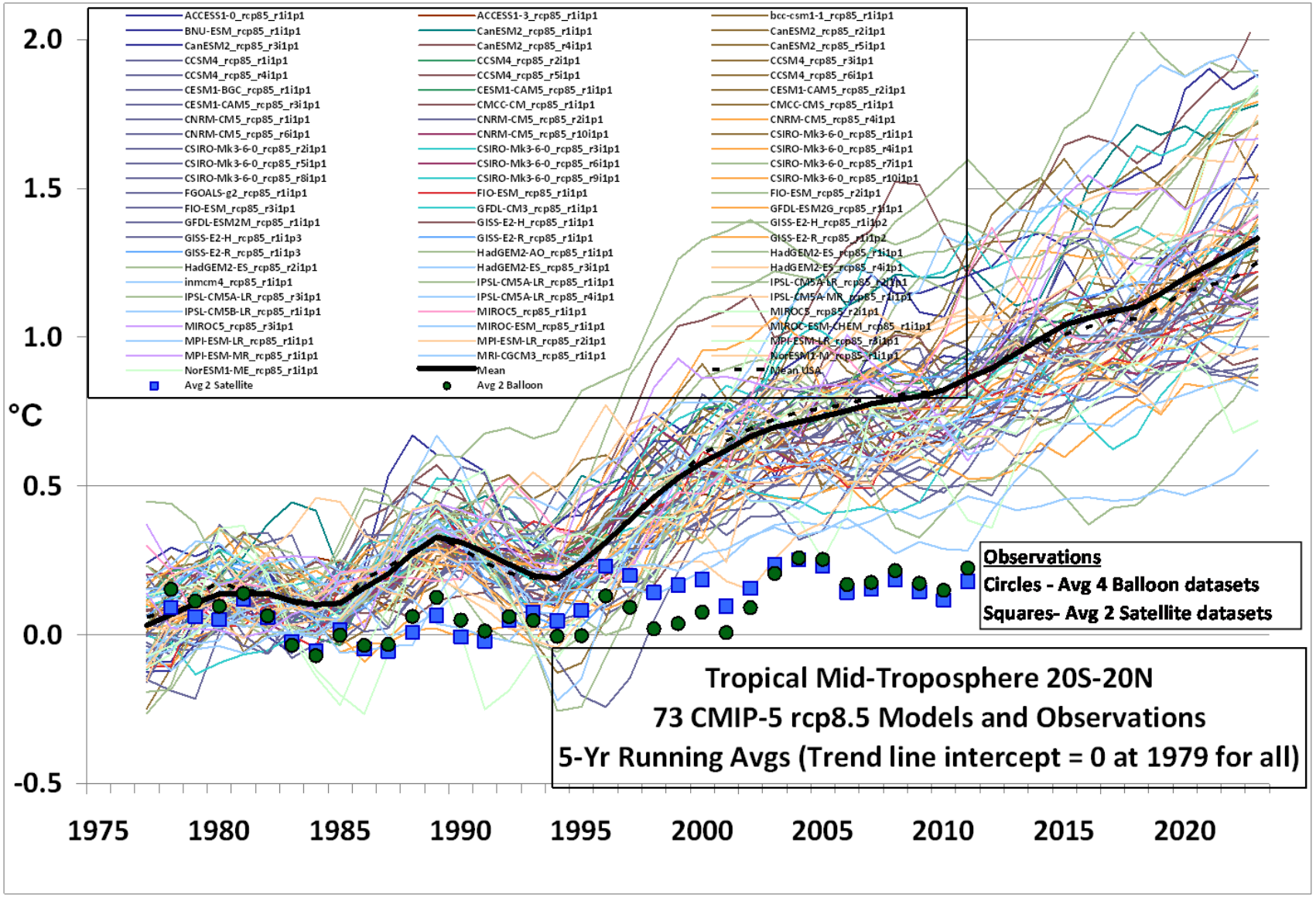
f_0(all) = 3/5

f_0(all) = β_0

L’anomalie de température atmosphérique 1983 - 2012

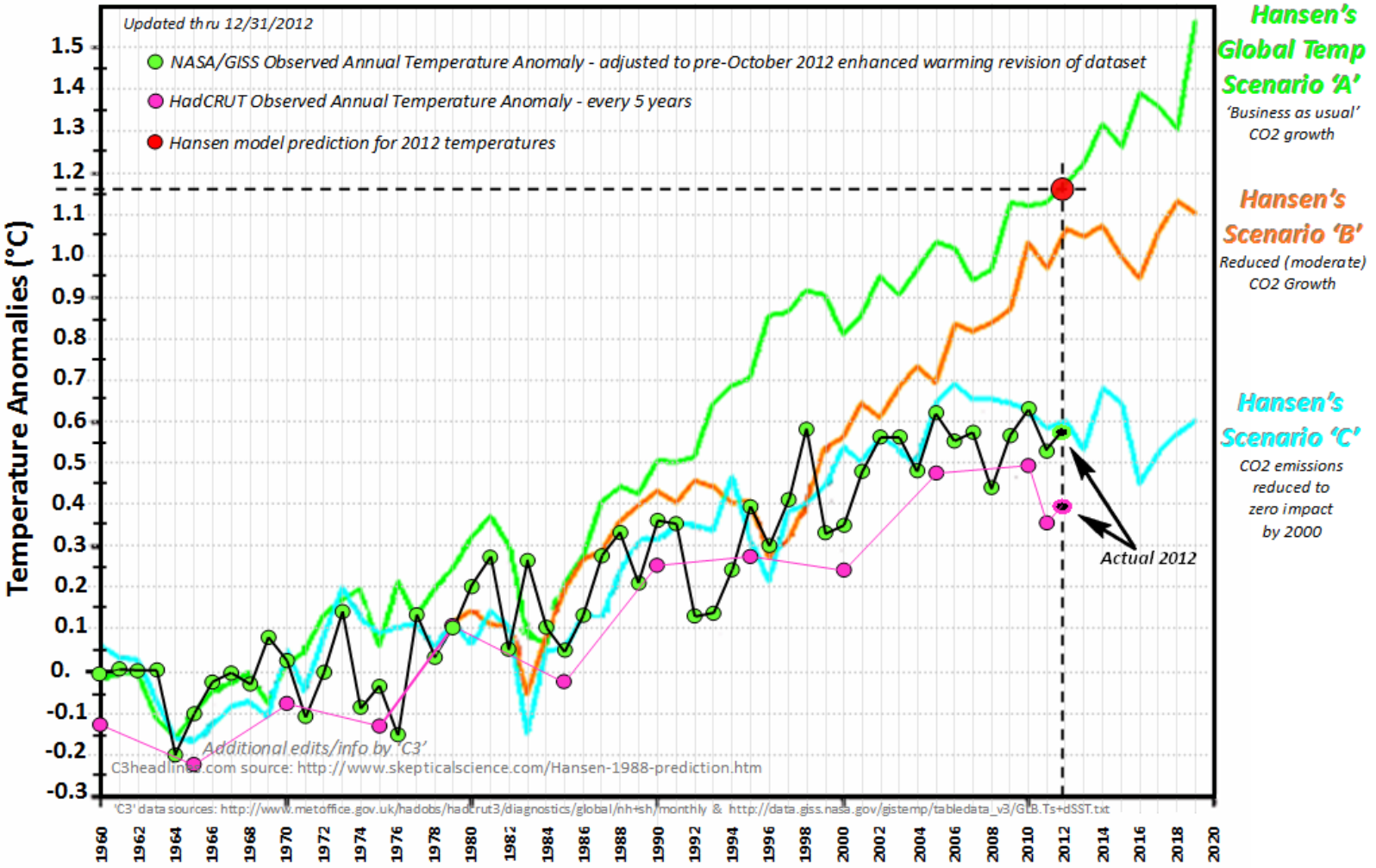


Les modèles et la réalité:



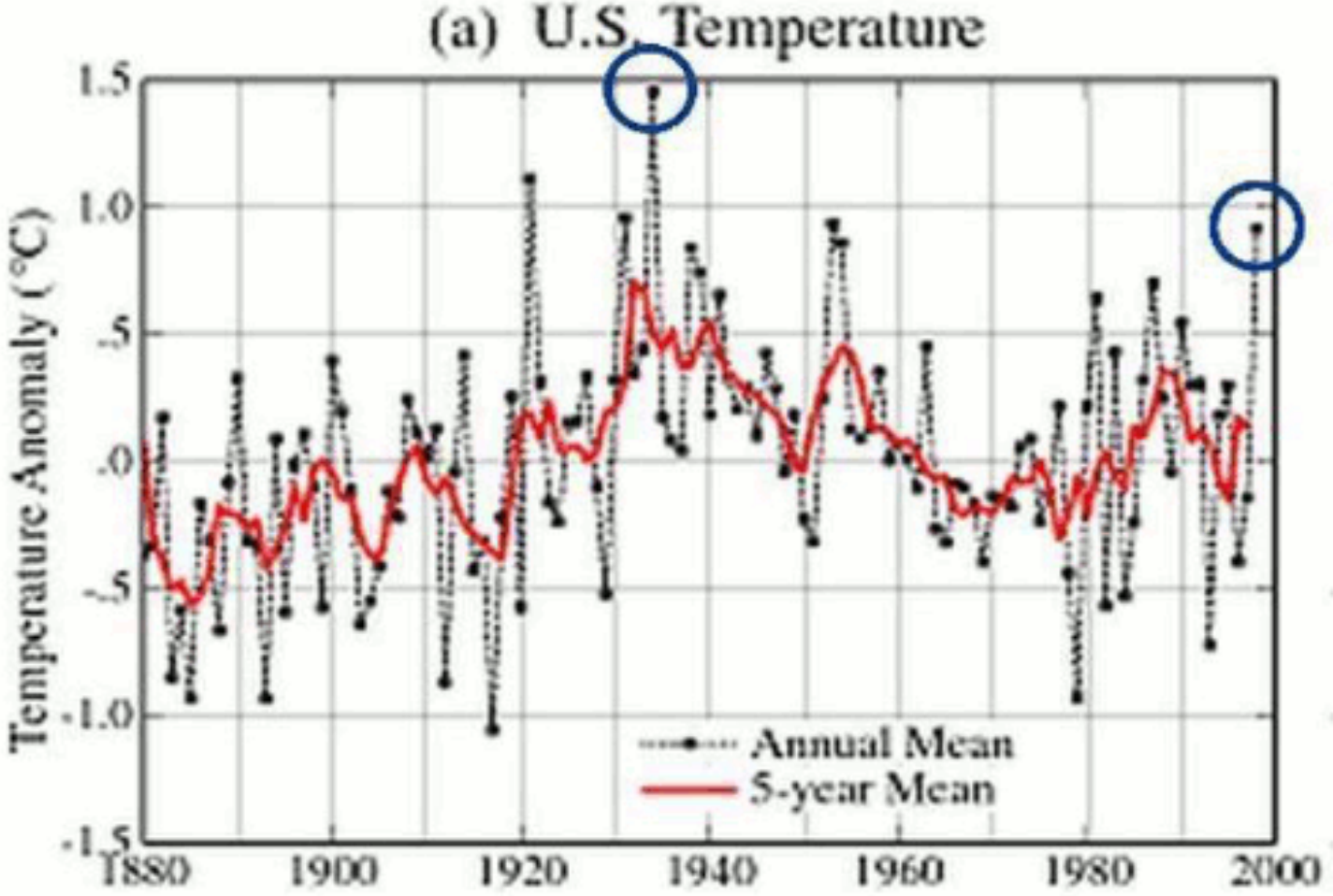
The NASA/Hansen Climate Model Predictions Vs. Reality - Major Fail

***Empirical evidence confirms abysmal performance of global climate* models**

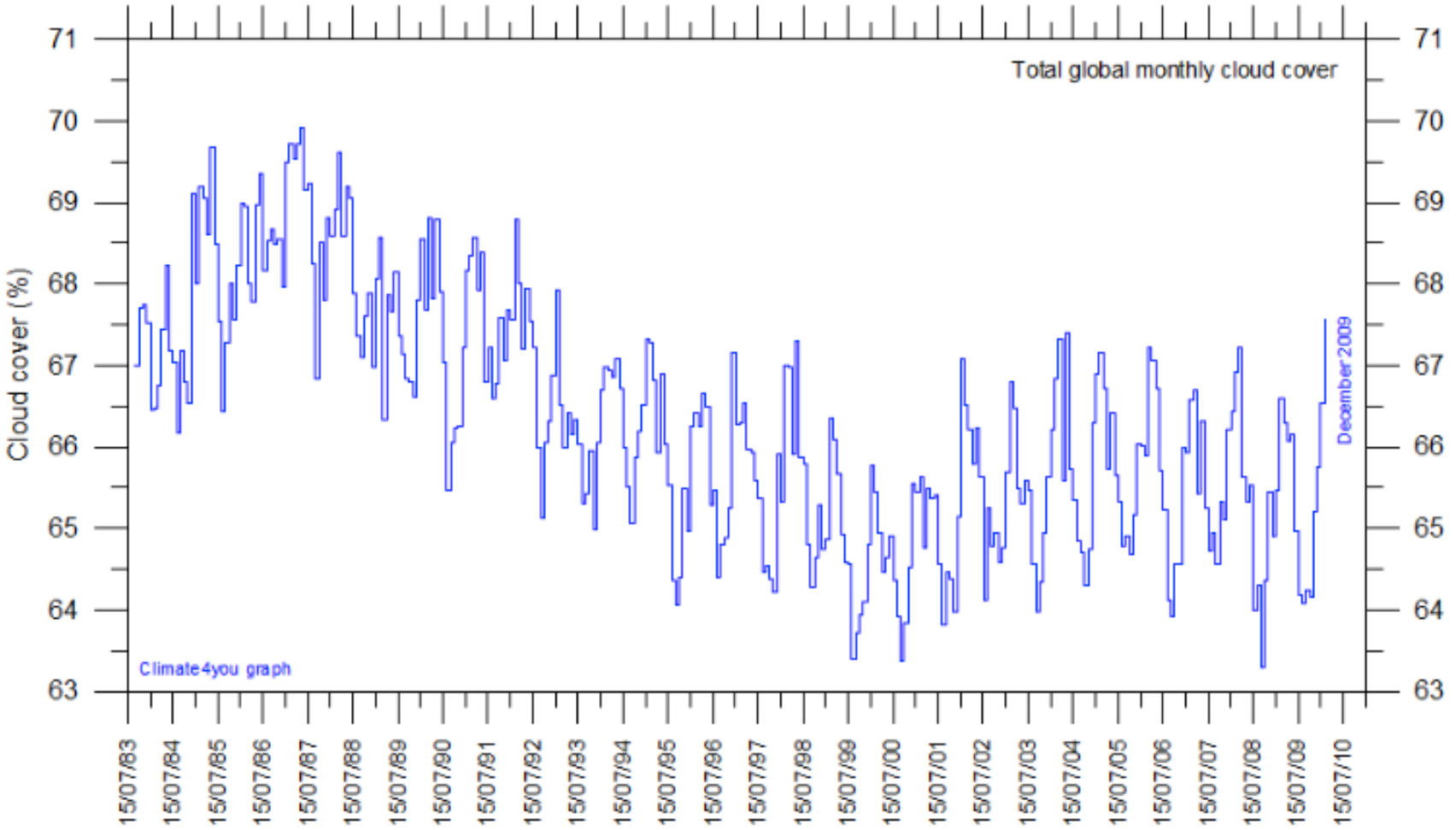


NASA climate model predictions vs. reality. Green dots(+black line) are actual annual GISS global temps (pink dots are HadCRUT). Green 'Scenario A' curve represents NASA global temp predictions for 'business-as-usual' CO2 emissions. Aqua curve 'Scenario C' represents global temperatures if CO2 emissions had been limited to 2000 CO2 emission levels.

Les prédictions changent avec le temps!



Les nuages peuvent jouer un rôle aussi



Le climat change… **toujours**

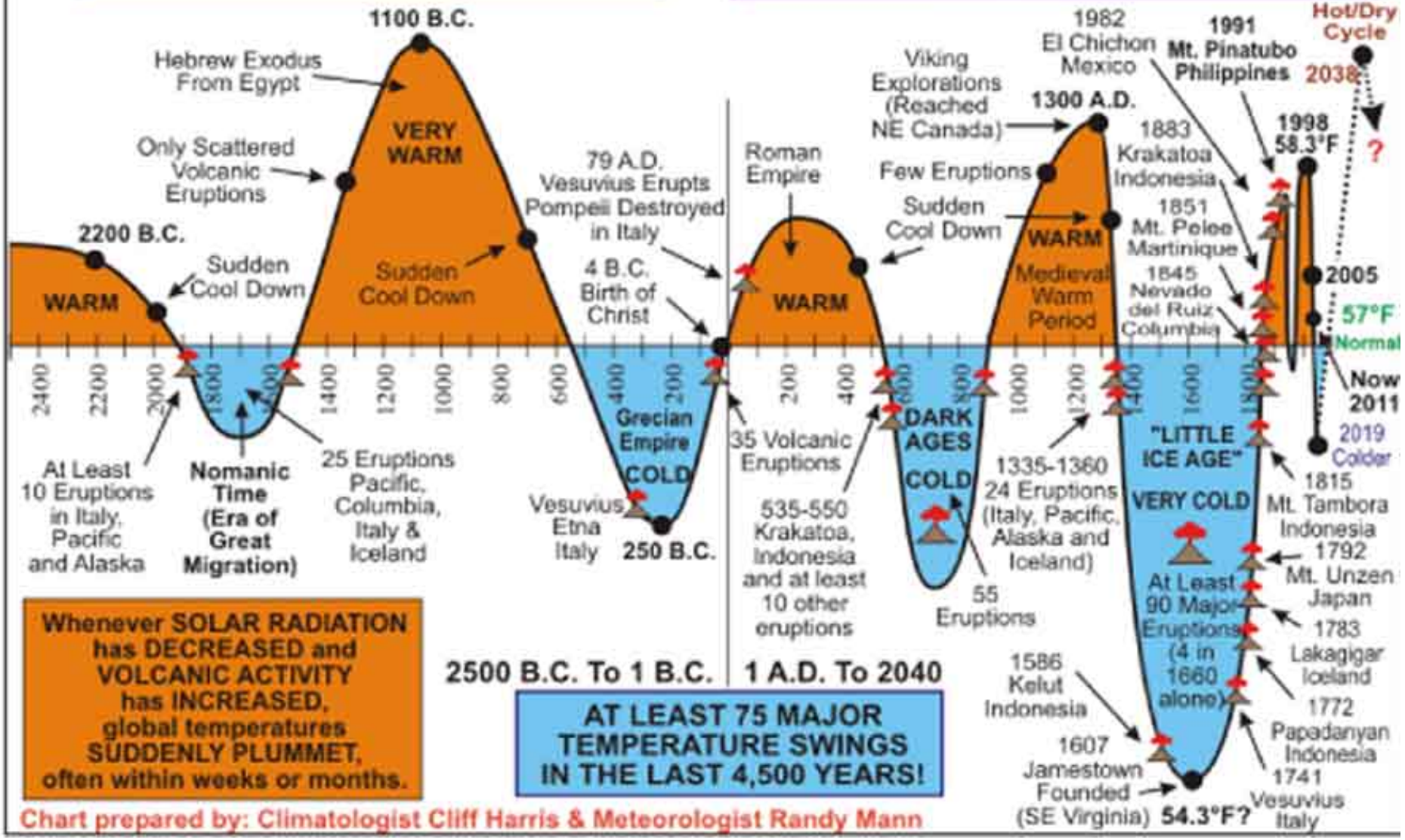
Il y a une panoplie de facteurs qui peuvent affecter les mesures de températures terrestres:

- Les nuages, la vapeur d'eau (un GES important)
- Les phénomènes de type « El Niño » et « La Niña »
- Les aérosols et les particules (y compris ceux produits par les volcans)
- L'activité solaire (surtout les taches solaires)
- La proximité des senseurs aux villes (chaudes) en expansion
- Les senseurs de température placés à différents endroits sur la Terre ou dans les océans
- Les courants océaniques (p. ex. le « Jet Stream »)…

GLOBAL TEMPERATURES (2500 B.C. TO 2040 A.D.)

MAJOR GLOBAL COOLING SINCE LATE 2007
A 0.9 Degree Fahrenheit drop in global temperatures from late 2007 to February 2009.

MOUNT PINATUBO ERUPTION (Philippines)
1.1 Degree F. Rapid Cool Down (June 1991 to March 1992)
Global Temperature Went From 0.6 Degrees Above Normal To 0.5 Degrees Below Normal.



Whenever SOLAR RADIATION has DECREASED and VOLCANIC ACTIVITY has INCREASED, global temperatures SUDDENLY PLUMMET, often within weeks or months.

2500 B.C. To 1 B.C. | 1 A.D. To 2040

AT LEAST 75 MAJOR TEMPERATURE SWINGS IN THE LAST 4,500 YEARS!

Chart prepared by: Climatologist Cliff Harris & Meteorologist Randy Mann

Les calottes de glace prises dans l'Antarctique à différentes profondeurs révèlent l'historique de la tempérture terrestre

Vostok (45) ice cores.

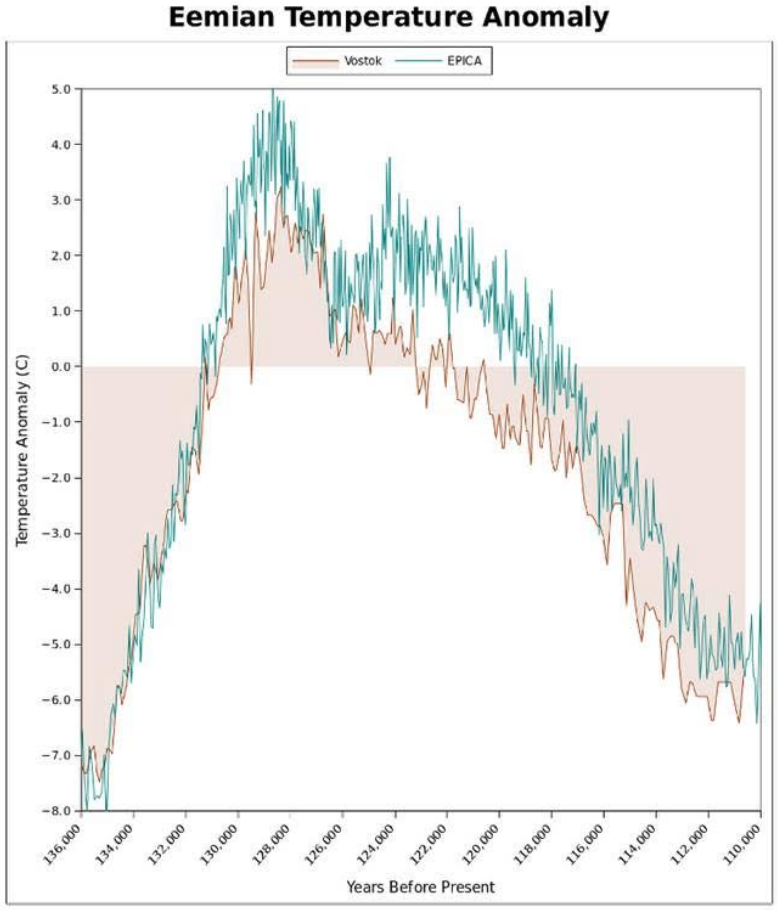
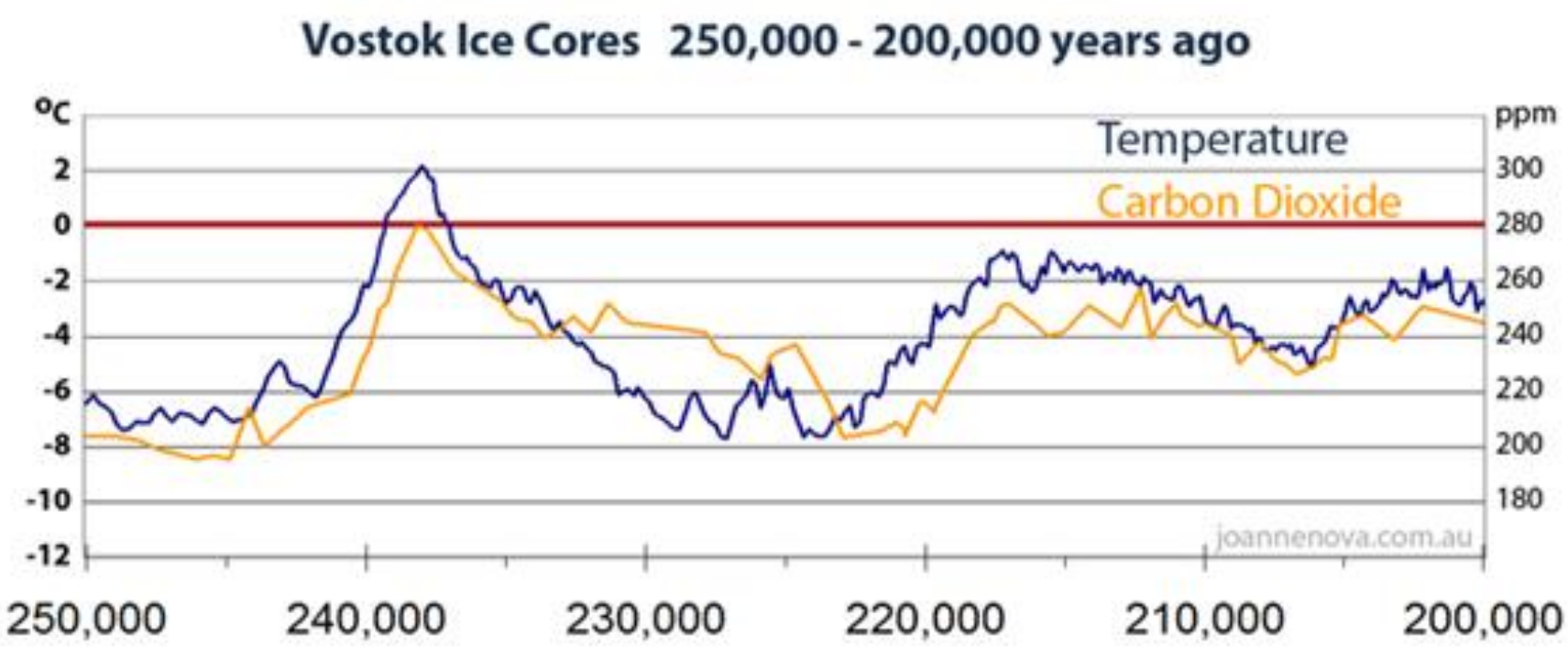
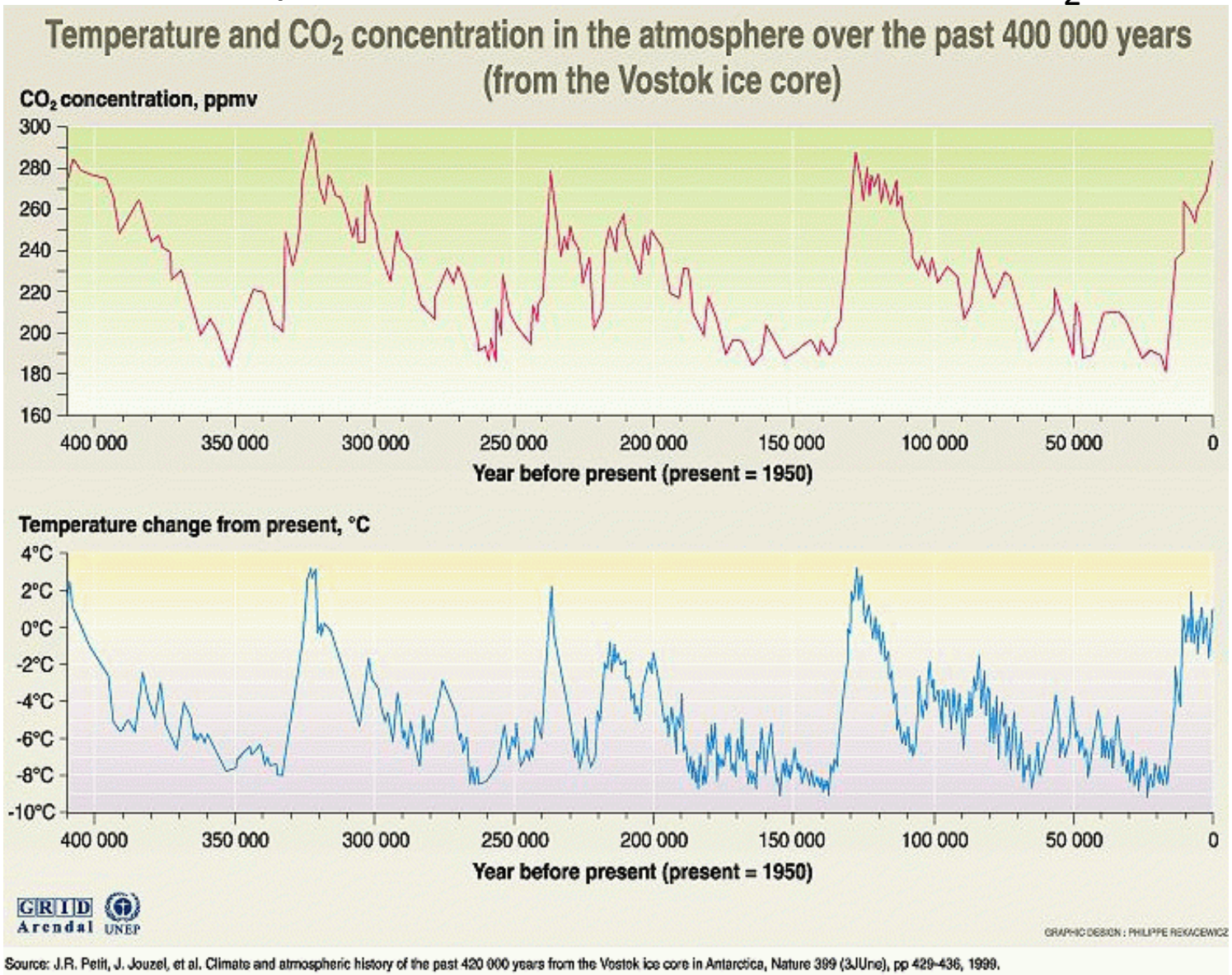


Illustration 30: The EPICA and Vostok ice core temperature reconstructions for the Eemian.

…et un peu plus loin dans le temps…

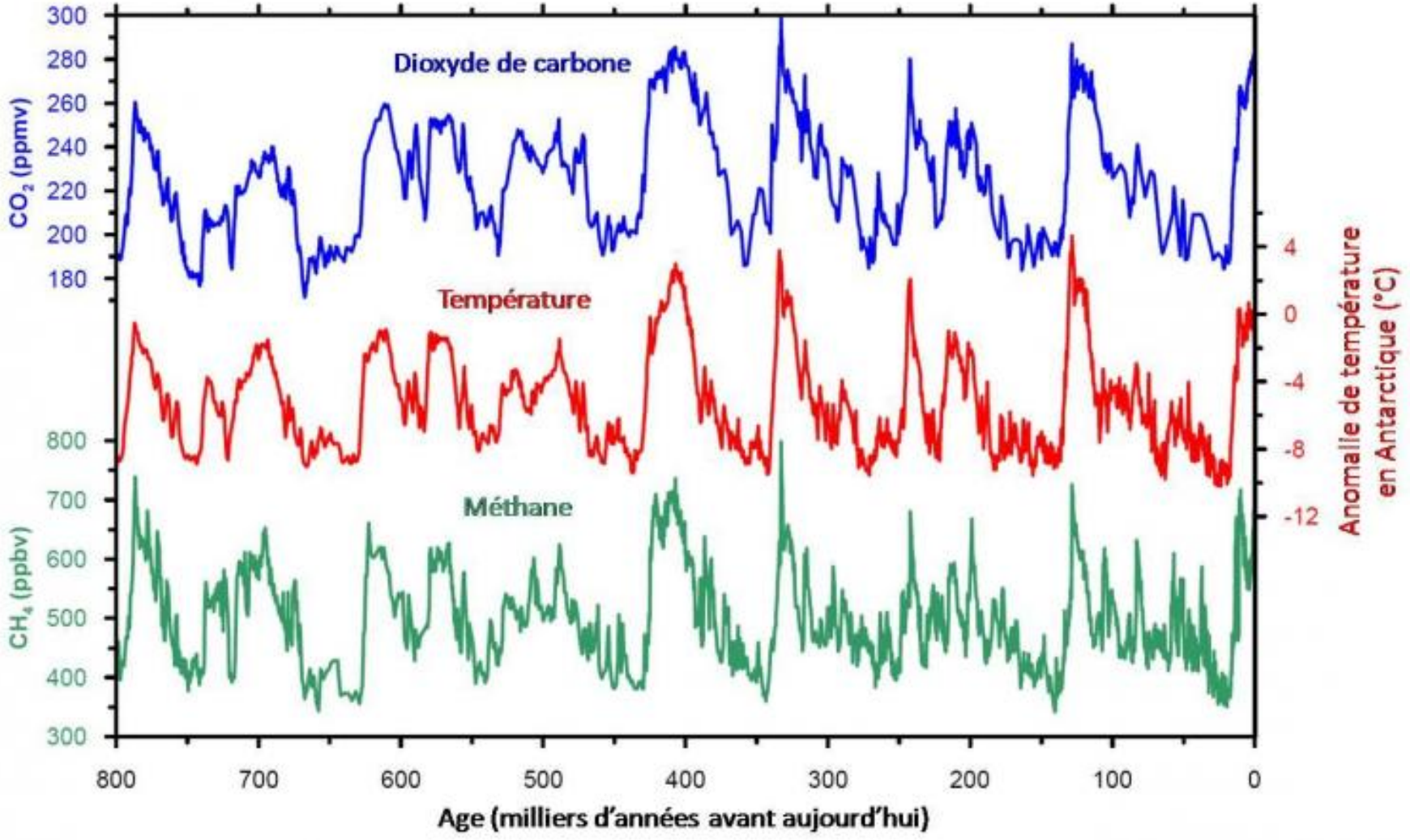


et depuis 400 000 ans…qu'est qui change en premier, la température ou la concentration de CO_2?

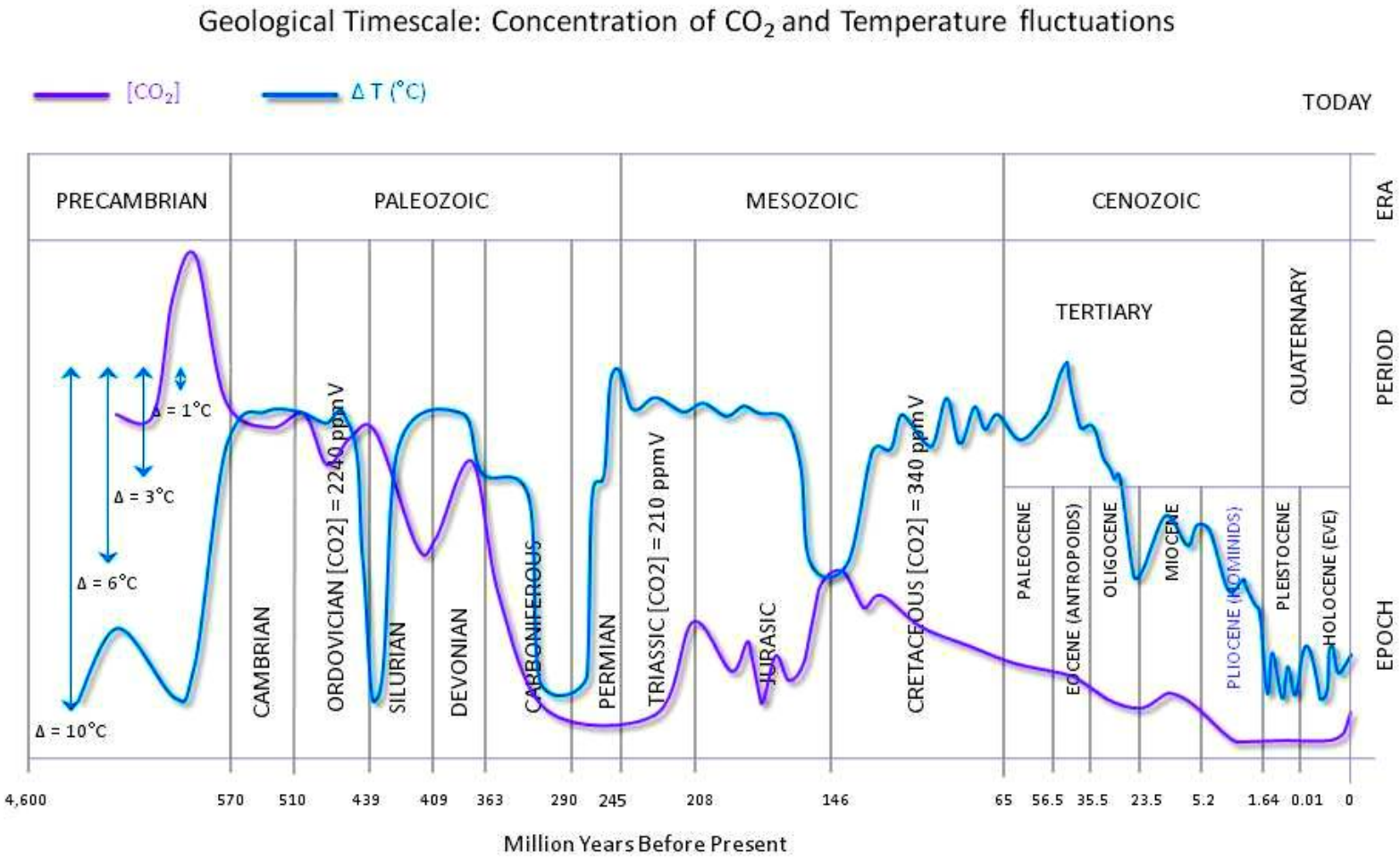


Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3JUne), pp 429-436, 1999.

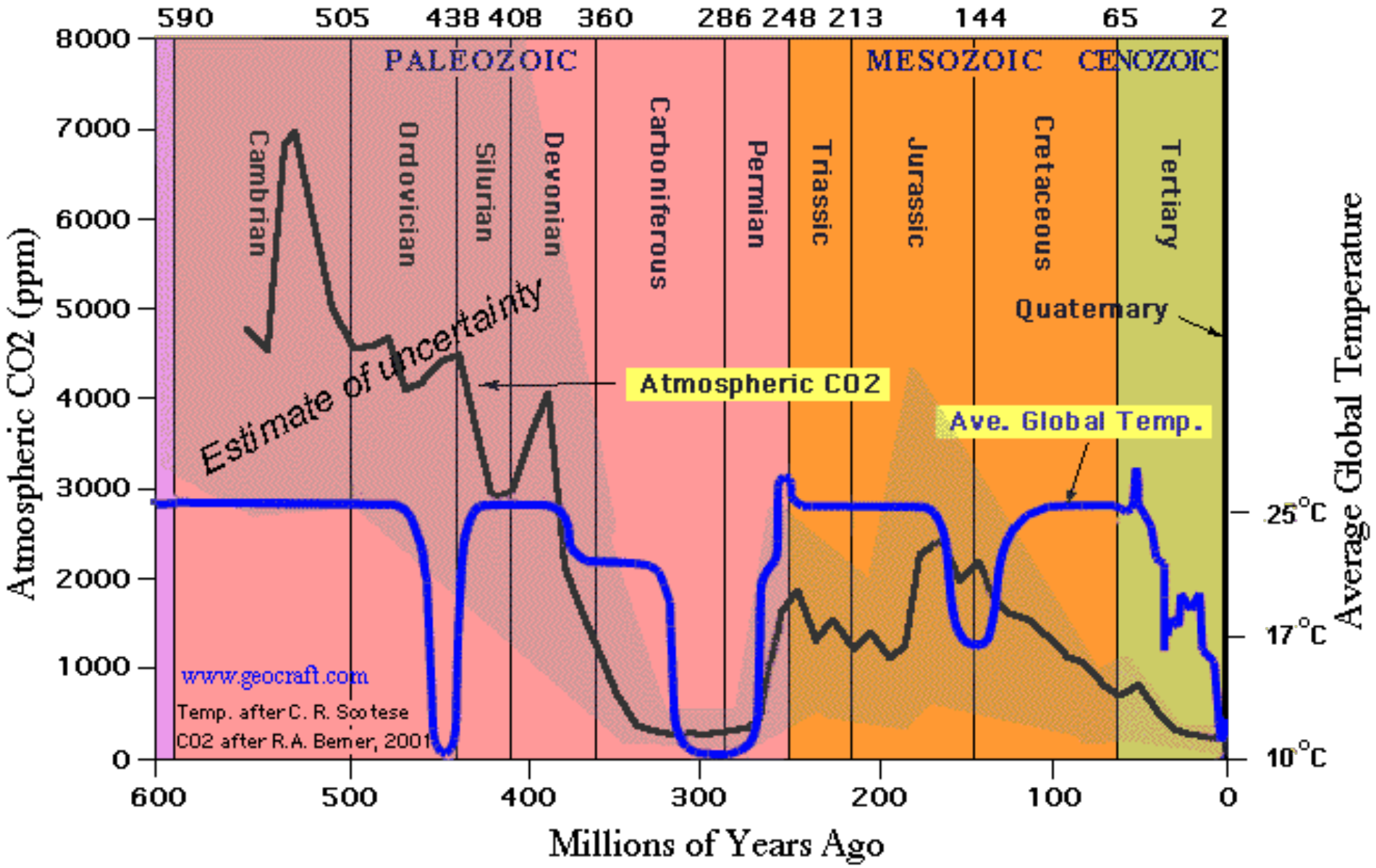
Méthane,CO_2, températures depuis 800 000 ans



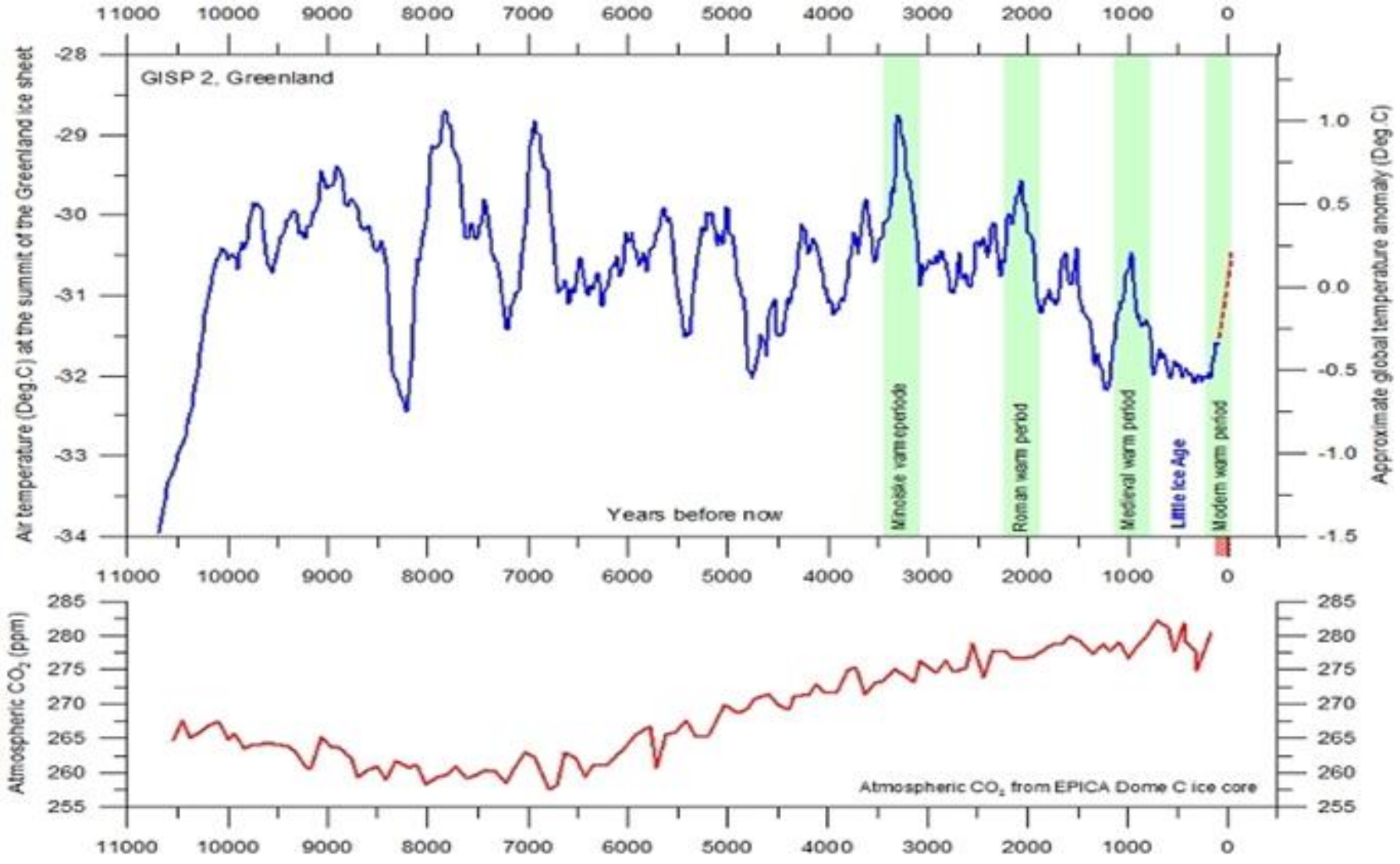
CO_2 vs. température Il y a très longtemps



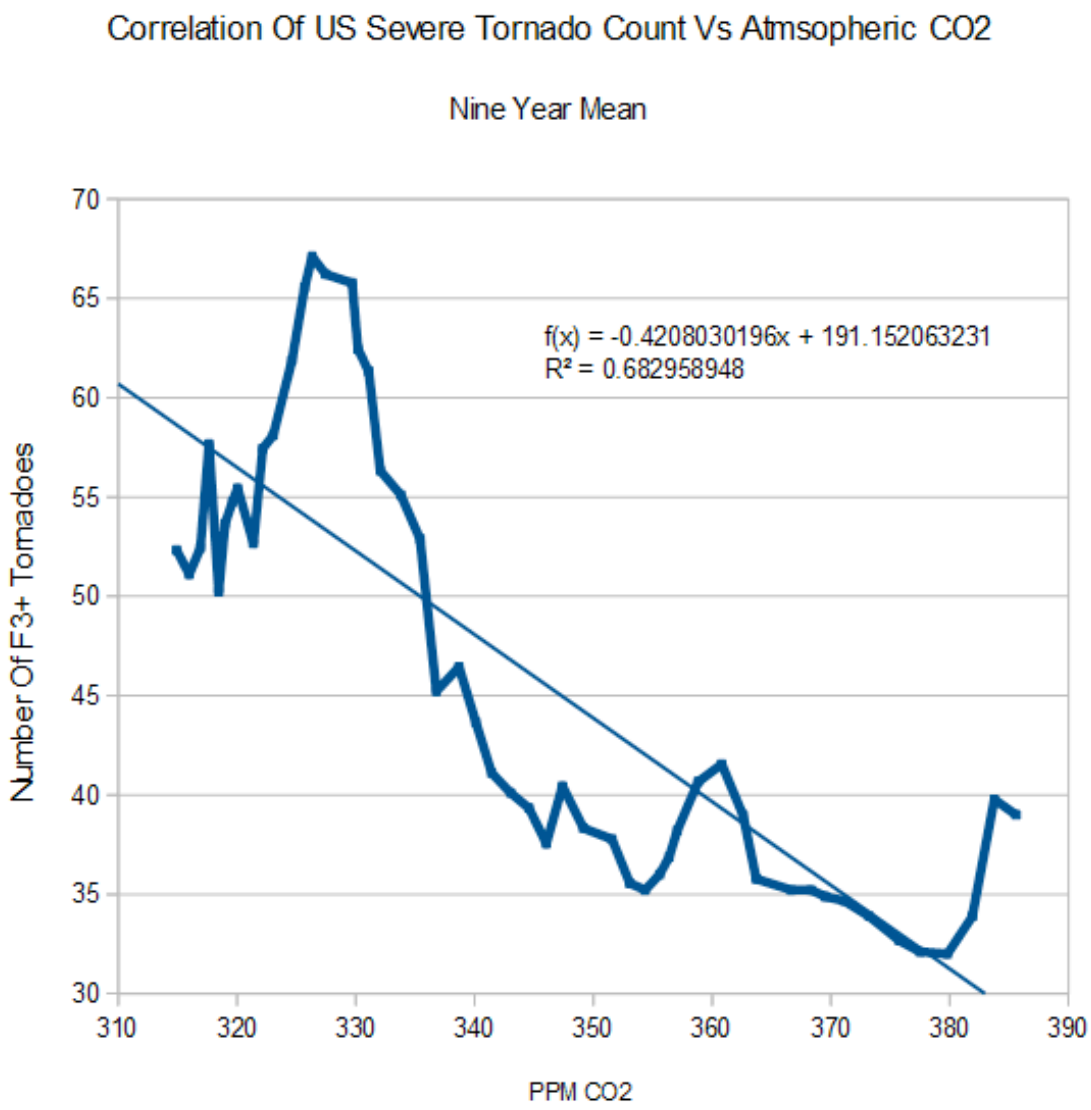
1- *Analysis of the Temperature Oscillations in Geological Eras* by Dr. C. R. Scotese © *2002*. 2- Ruddiman, W. F. 2001. *Earth's Climate: past and future*. W. H. Freeman & Sons. New York, NY. 3- Mark Pagani *et all*. *Marked Decline in Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations During the Paleocene*. Science; Vol. 309, No. 5734; pp. 600-603. 22 July 2005. *Conclusion and Interpretation* by Nasif Nahle ©2005, 2007. *Corrected on 07 July 2008 (CO2: Ordovician Period).*


590
505
438 408
360
286 248 213
144
65
2
PALEOZOIC
MESOZOIC
CENOZOIC
Cambrian
Ordovician
Silurian
Devonian
Carboniferous
Permian
Triassic
Jurassic
Cretaceous
Tertiary
Quaternary
Estimate of uncertainty
Atmospheric CO2
Ave. Global Temp.
www.geocraft.com
Temp. after C. R. Scotese
CO2 after R.A. Berner, 2001
Atmospheric CO2 (ppm)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
600
500
400
300
200
100
0
Millions of Years Ago
25°C
17°C
10°C
Average Global Temperature

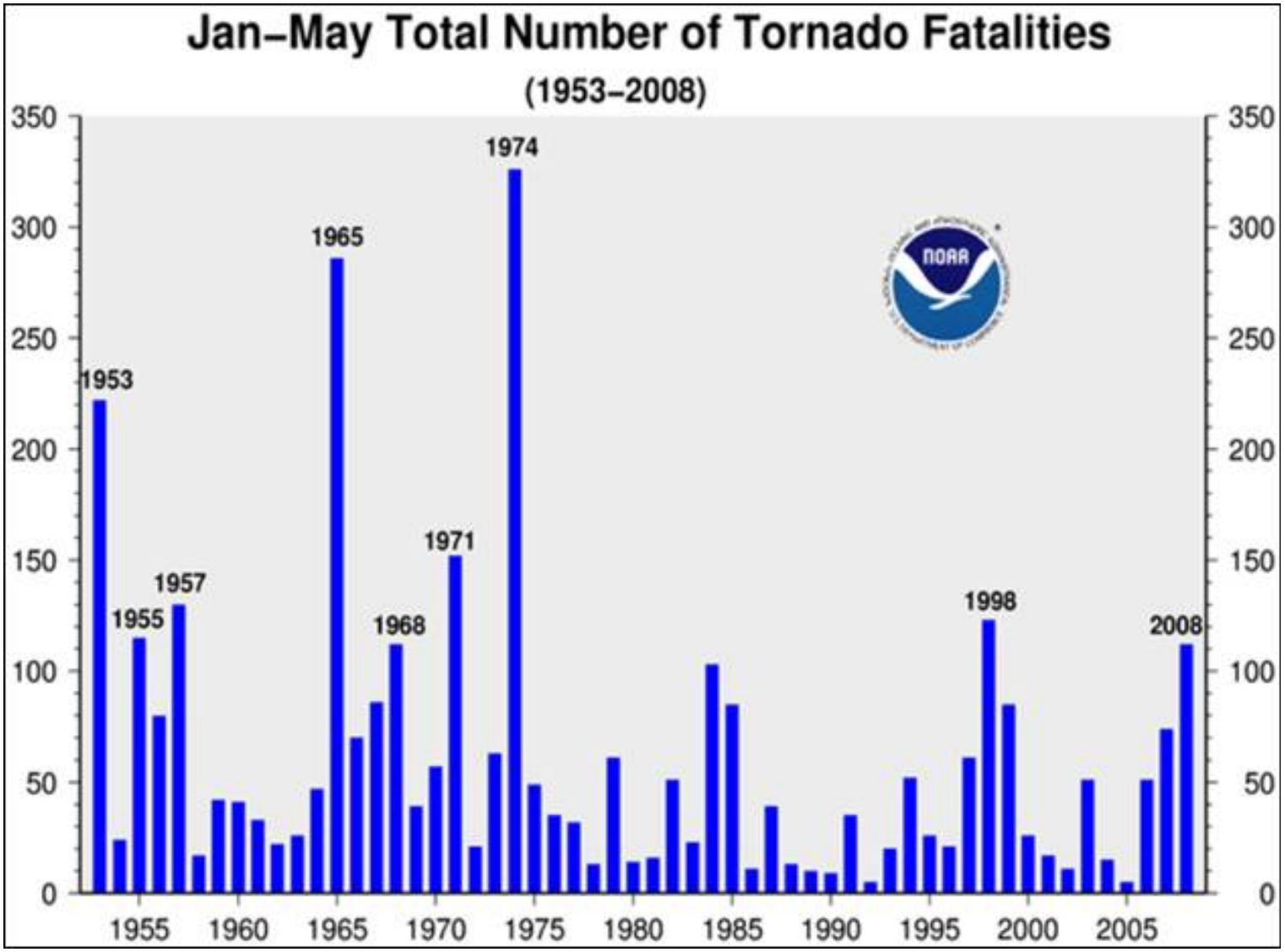
La température en Groenland depuis 10 000 ans



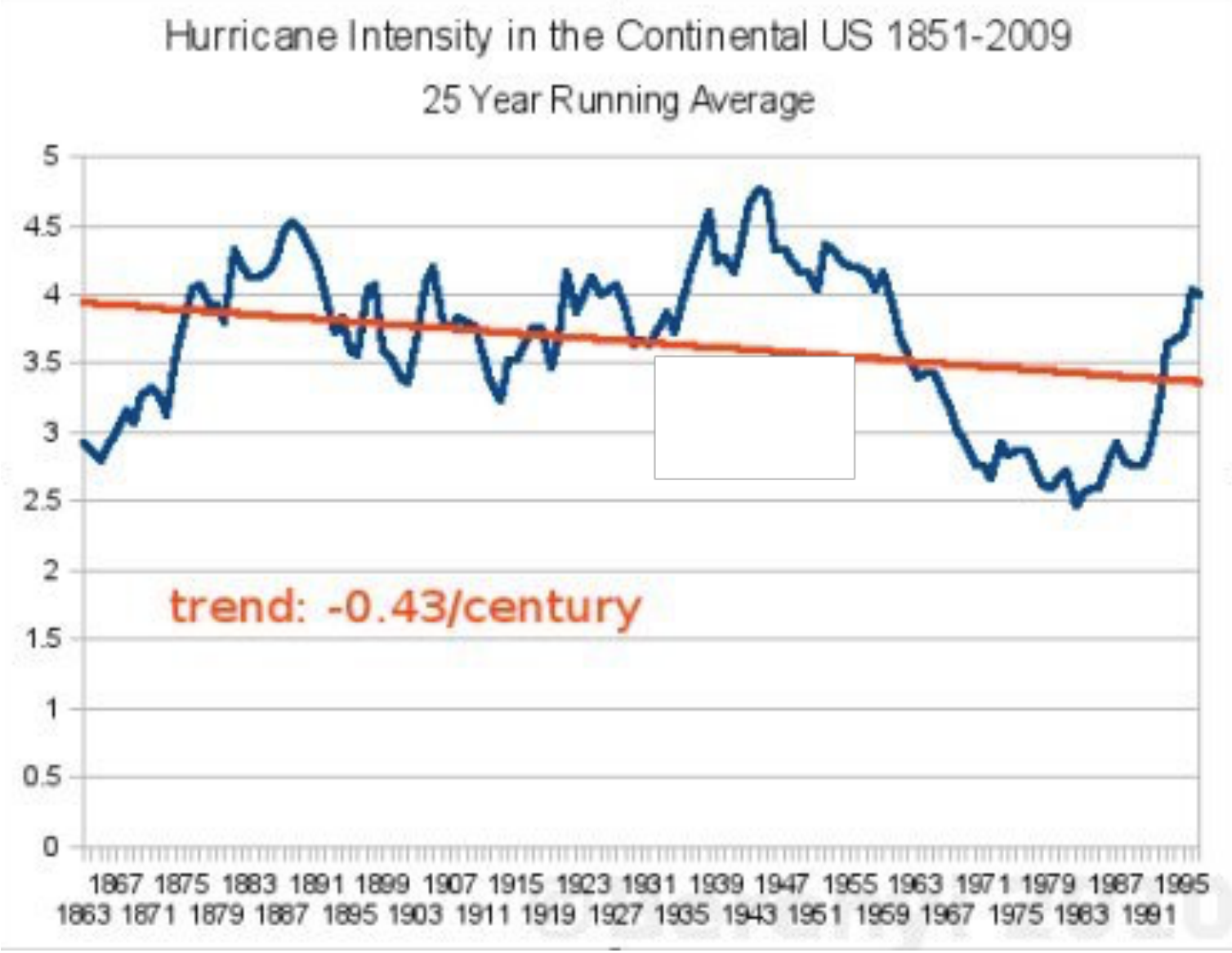
Les tornades (US) et le CO_2 atmosphérique



Morts dûs aux tornades



Les ouragans et le climat changeant

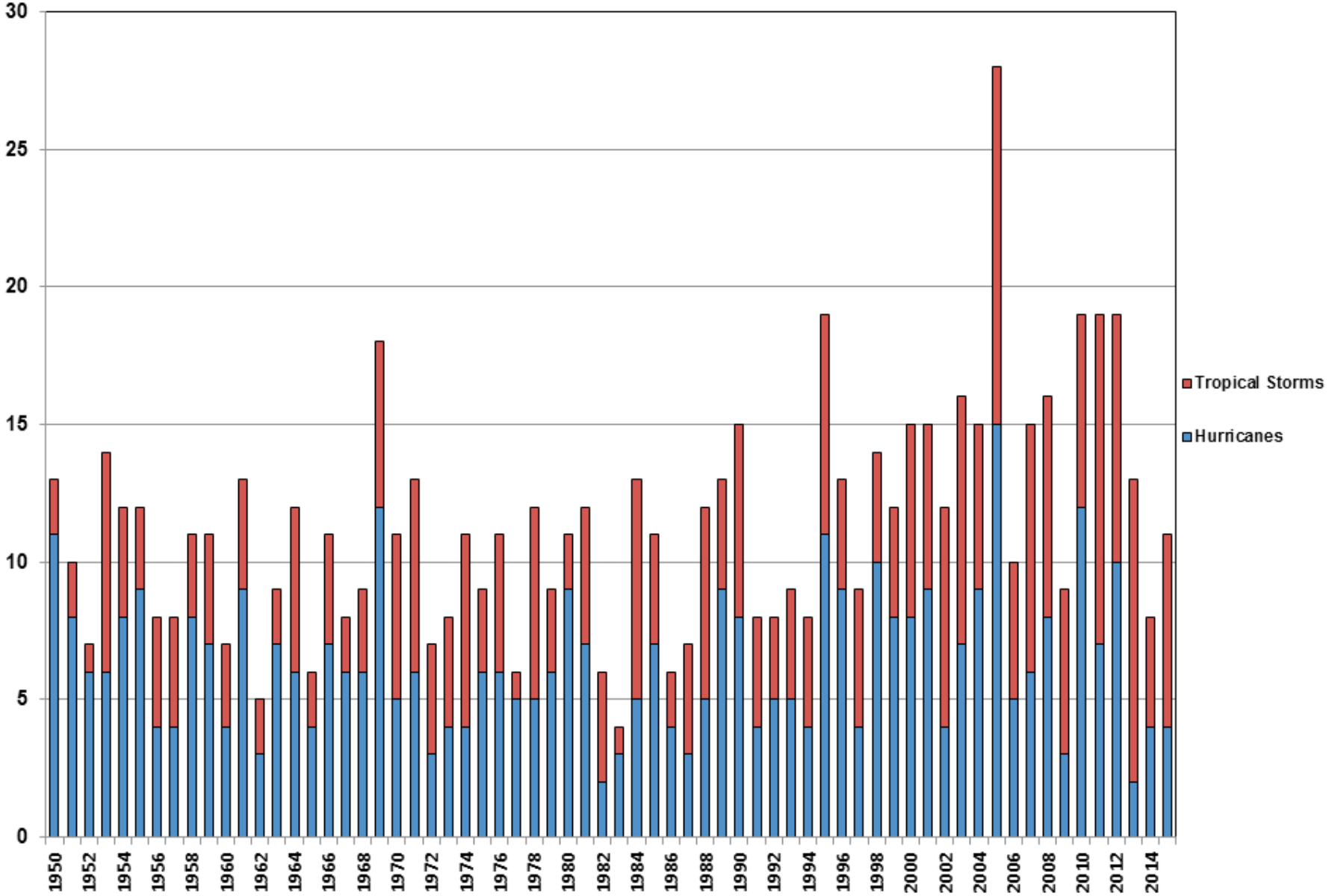


North Atlantic Basin

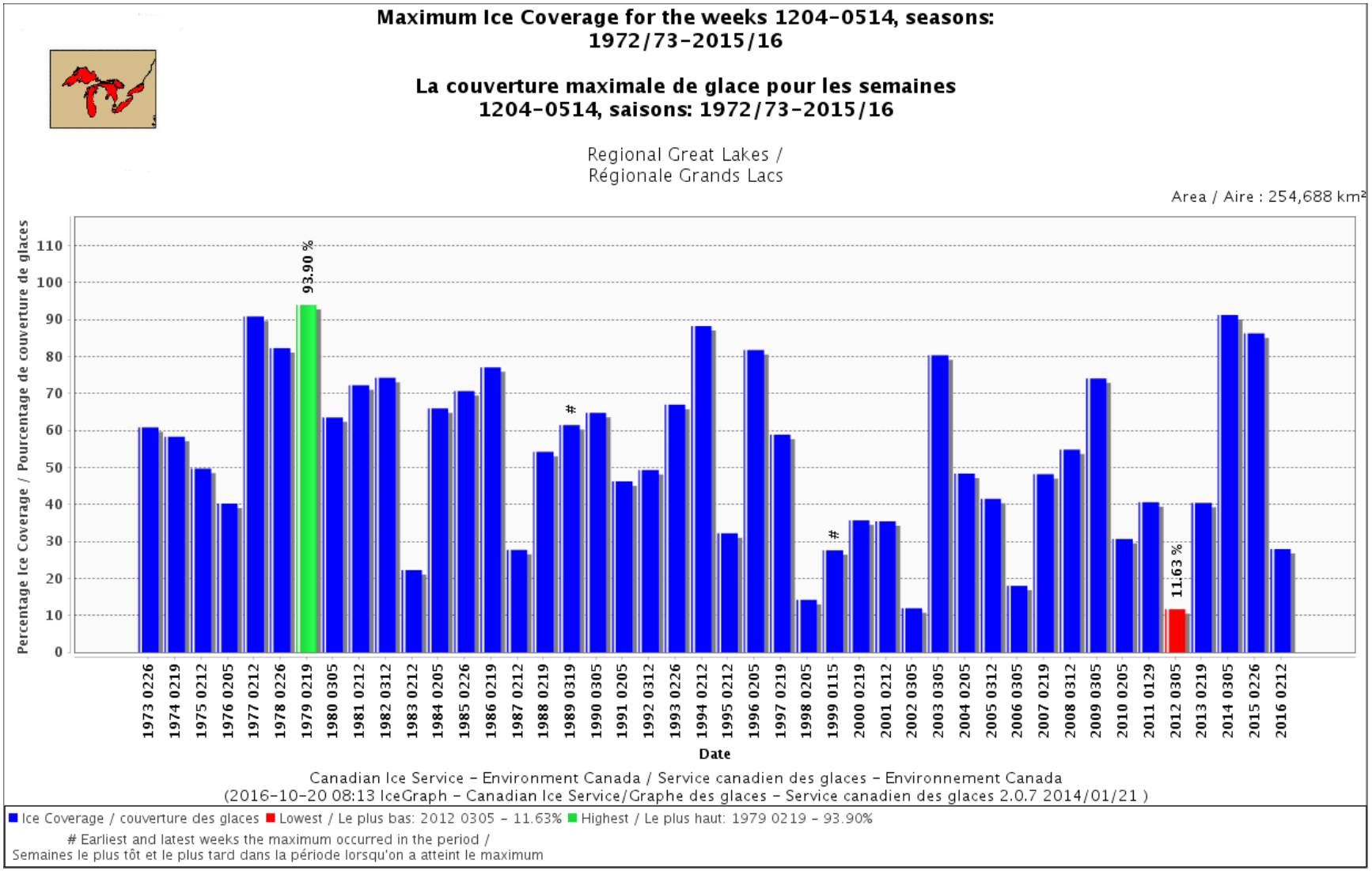
Number of Tropical Storms and Hurricanes

1950-2015

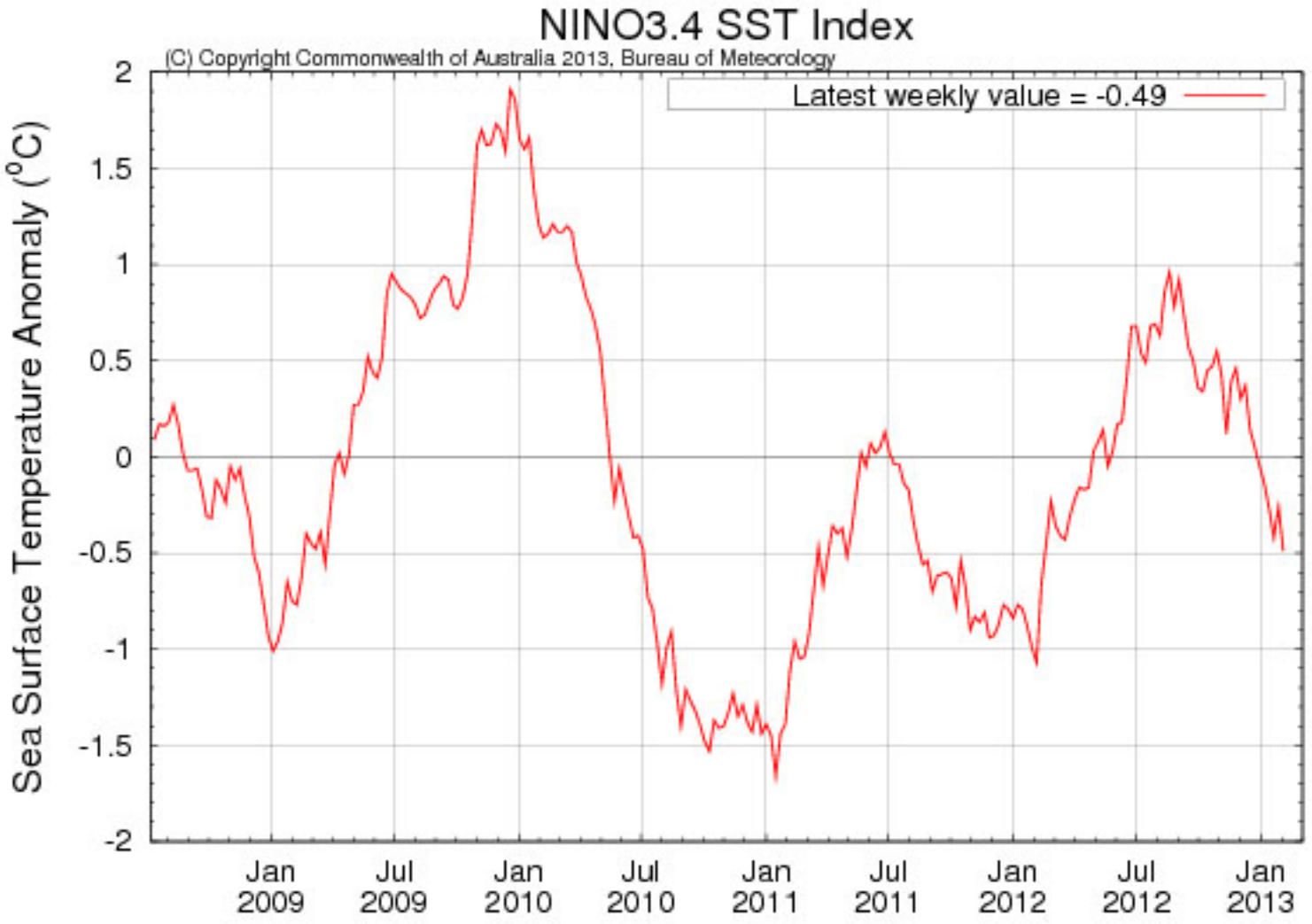
NOAA's National Climatic Data Center

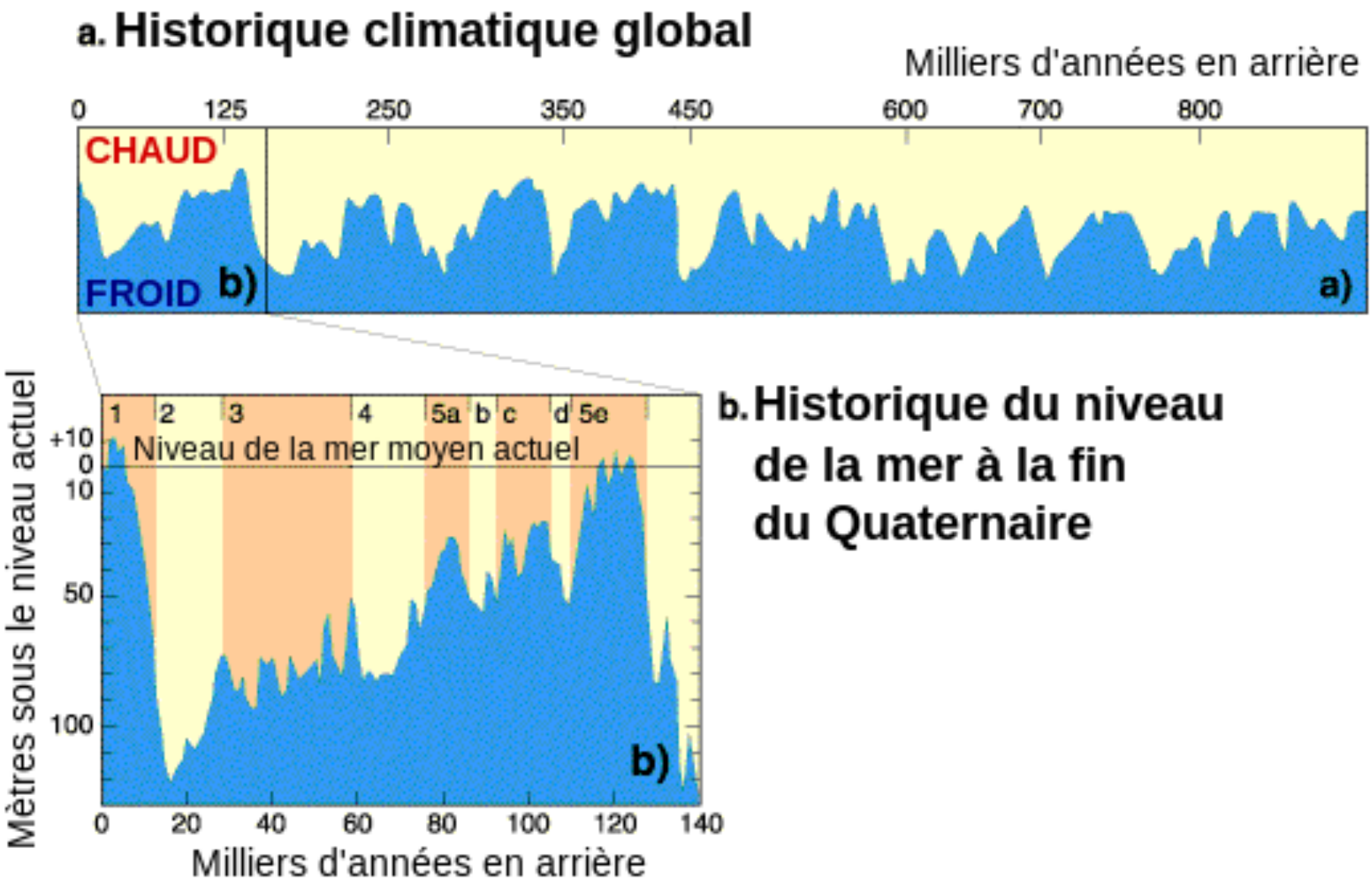


La couverture en glace des Grands lacs

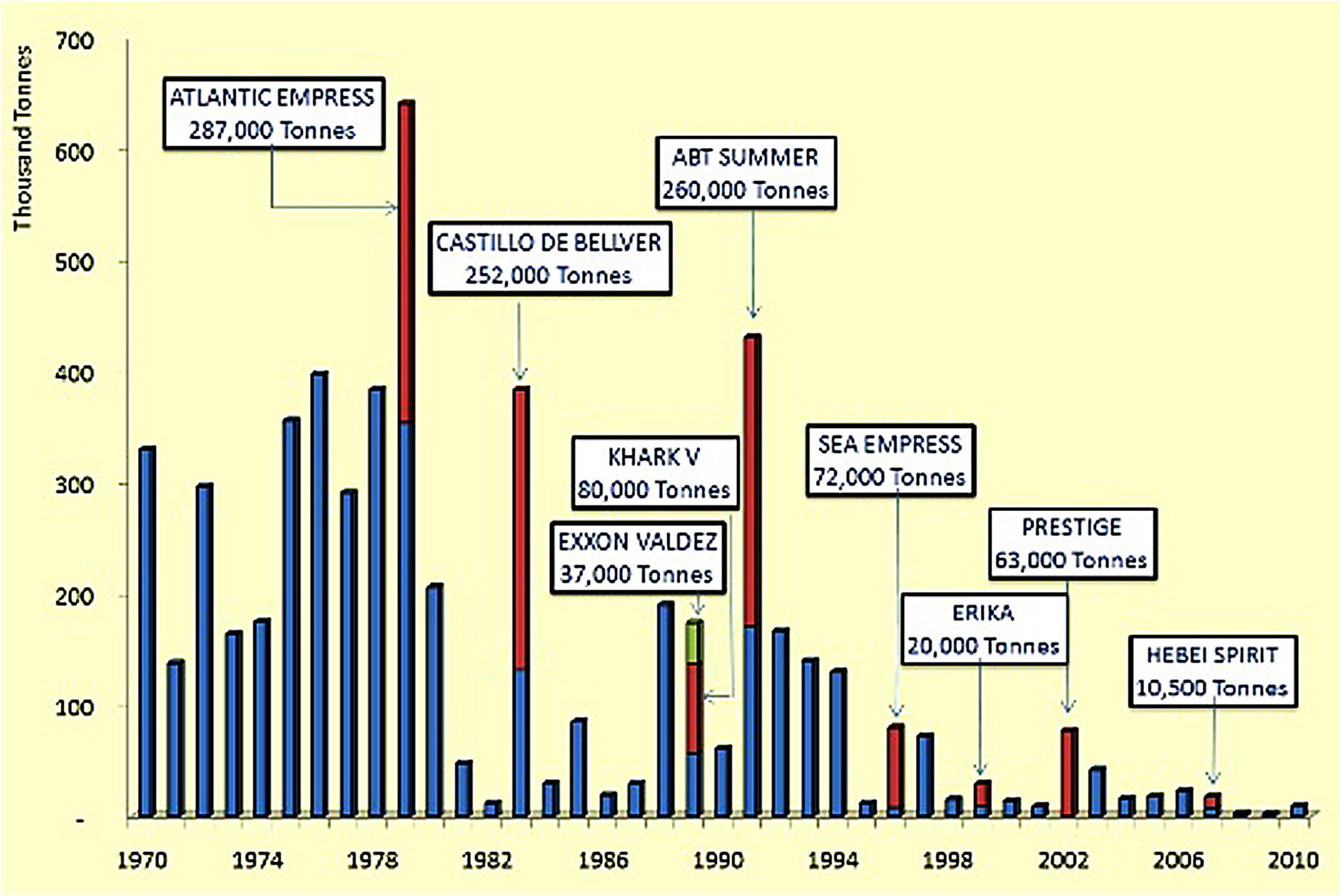


Les températures récentes à la surface de la mer



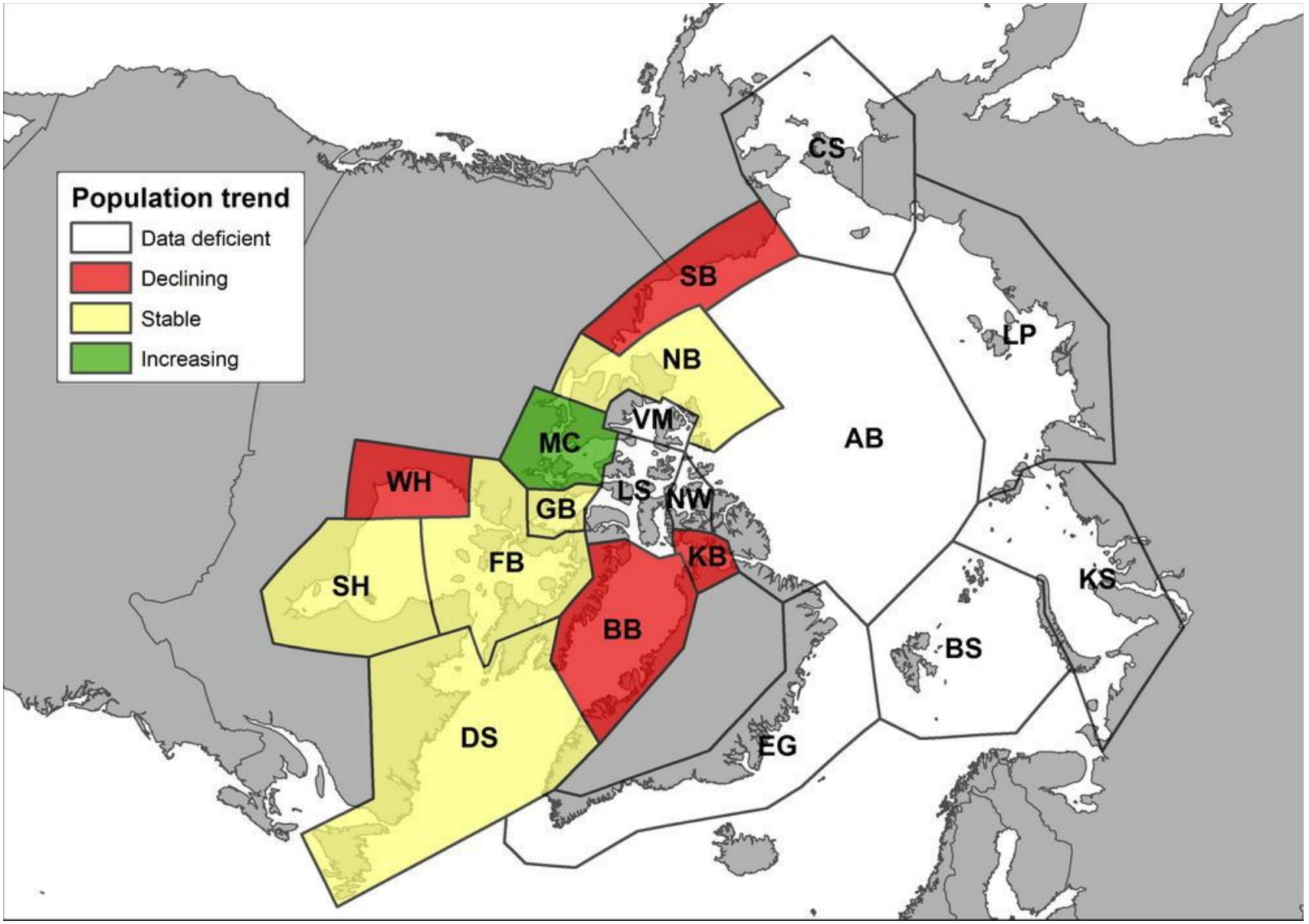

a. Historique climatique global
Milliers d'années en arrière
0
125
250
350
450
600
700
800
CHAUD
FROID
b)
a)
b. Historique du niveau de la mer à la fin du Quaternaire
Mètres sous le niveau actuel
+10
0
10
50
100
1
2
3
4
5a
b
c
d
5e
Niveau de la mer moyen actuel
b)
0
20
40
60
80
100
120
140
Milliers d'années en arrière

Les déversements du pétrole

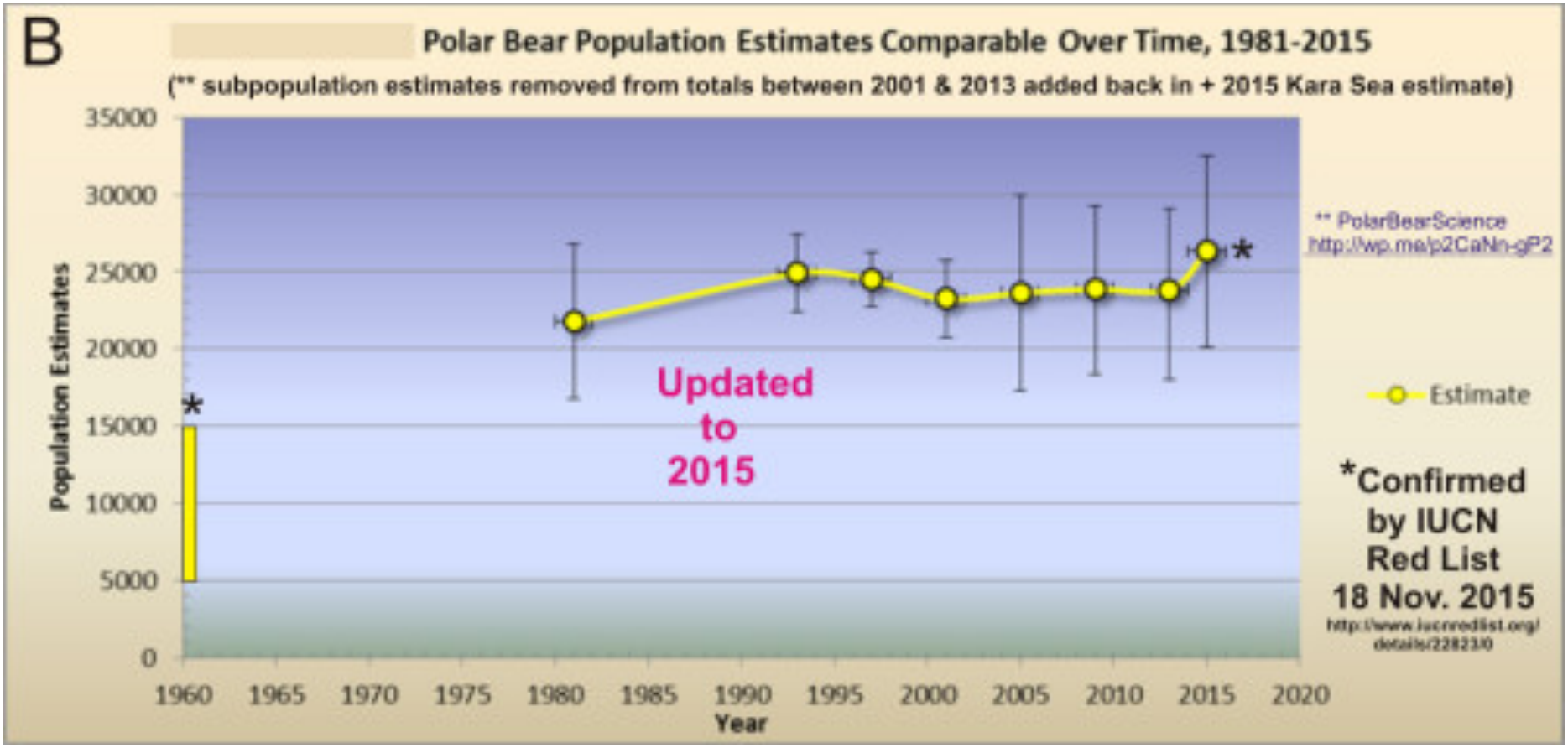


Est-ce que les ours polaires disparaissent à cause du réchauffement?

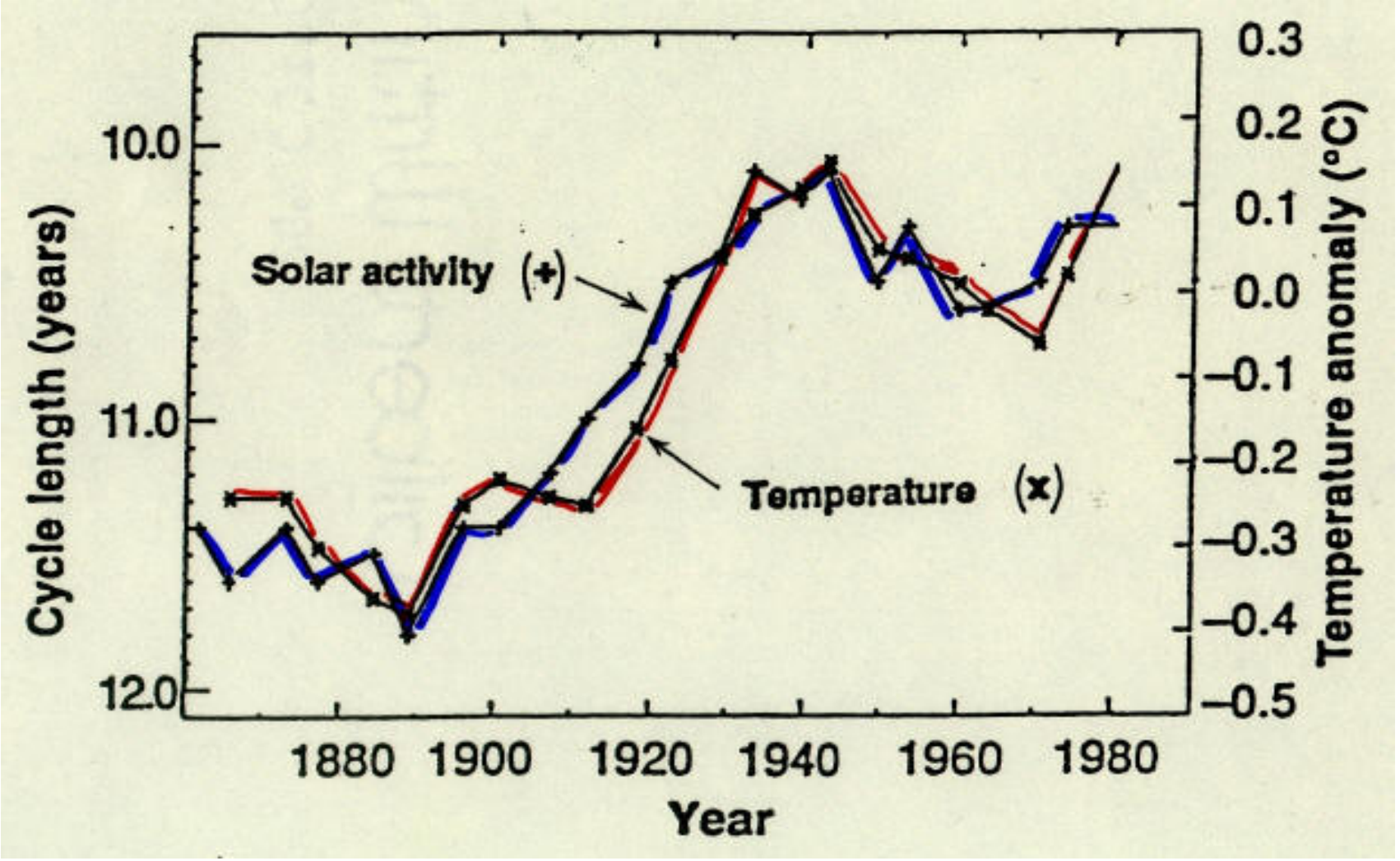
C’est un peu compliqué…



Leur situation ne semble pas dramatique

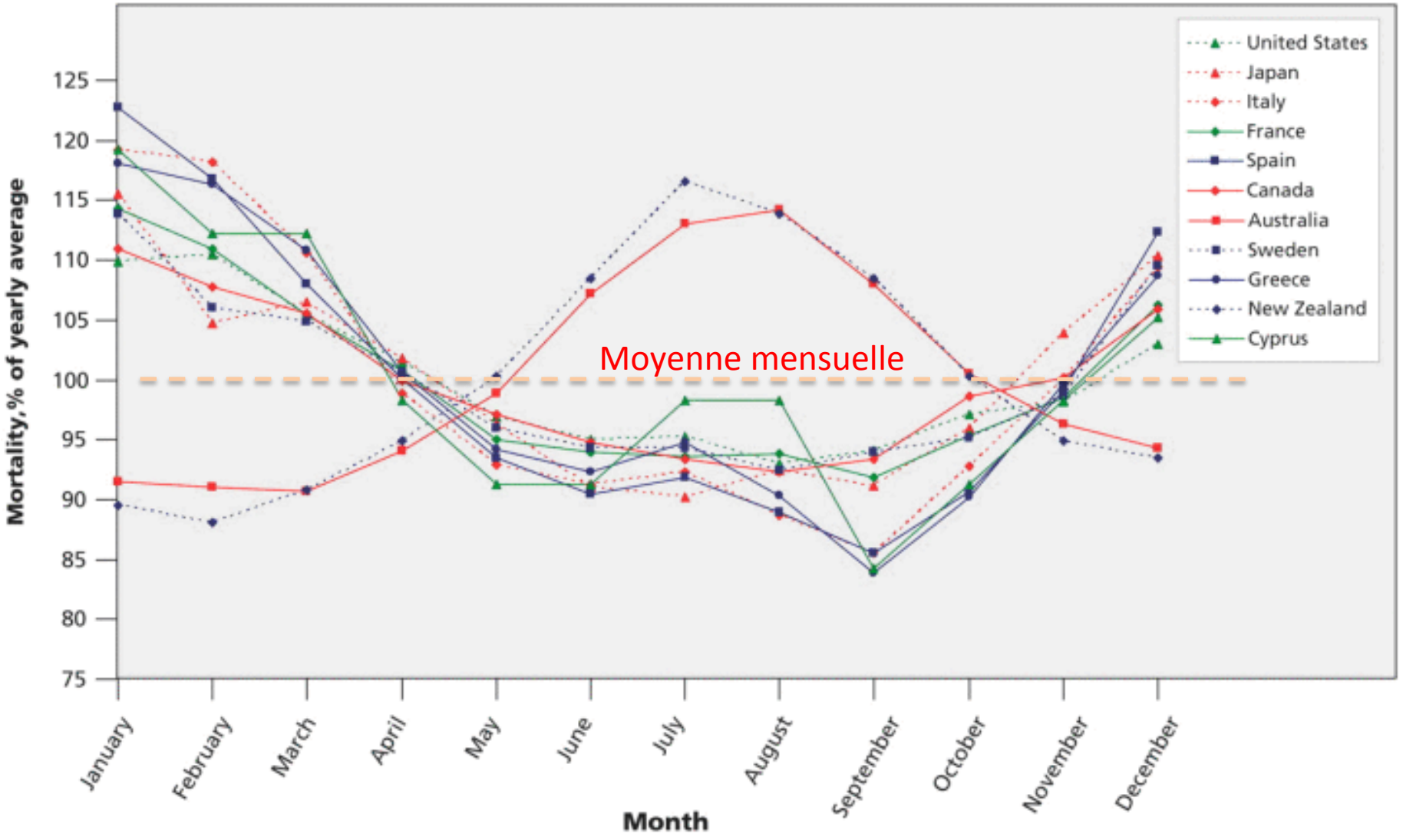


Est-ce qu'on devrait considérer aussi l'effet du soleil?



« Il faut toujours se méfier des prédictions, surtout quand elles concernent le futur » - N. Bohr

De toute façon, le froid est plus mortel que la chaleur



pause