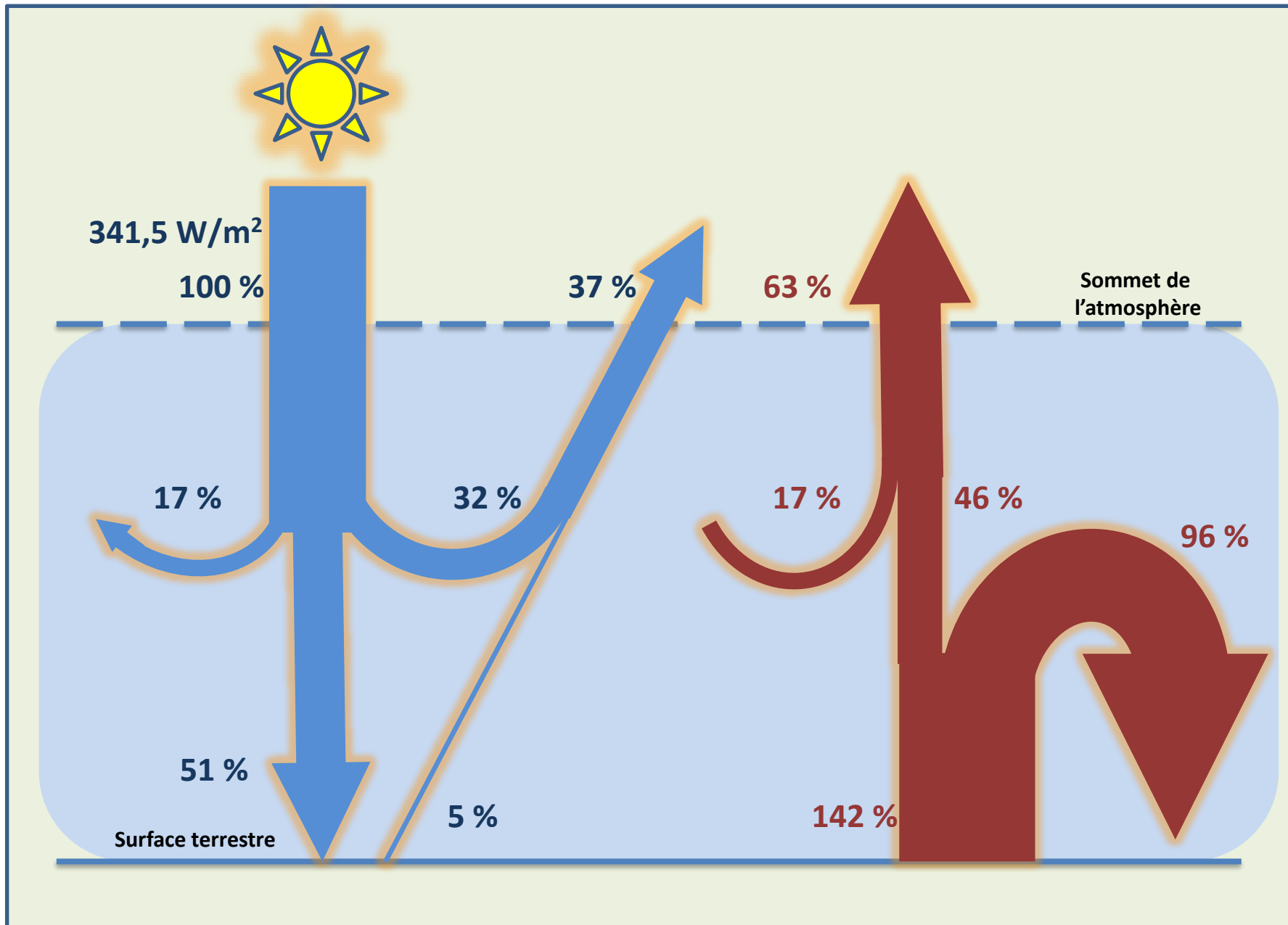


# Le réchauffement climatique

R. Verret







## Forçage radiatif anthropique (2011 par rapport à 1750)

$2,2 \text{ W/m}^2$

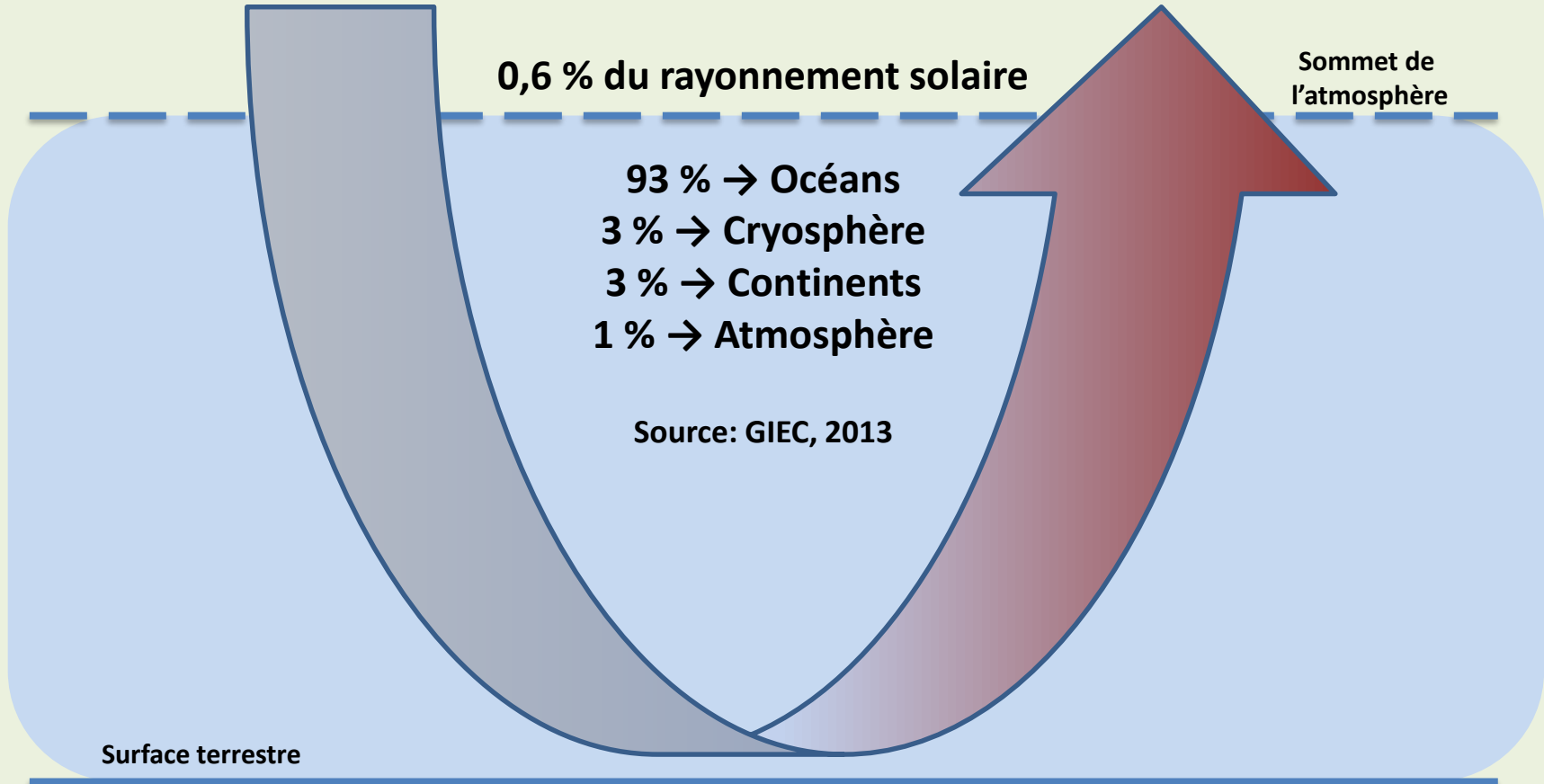
0,6 % du rayonnement solaire

Sommet de  
l'atmosphère

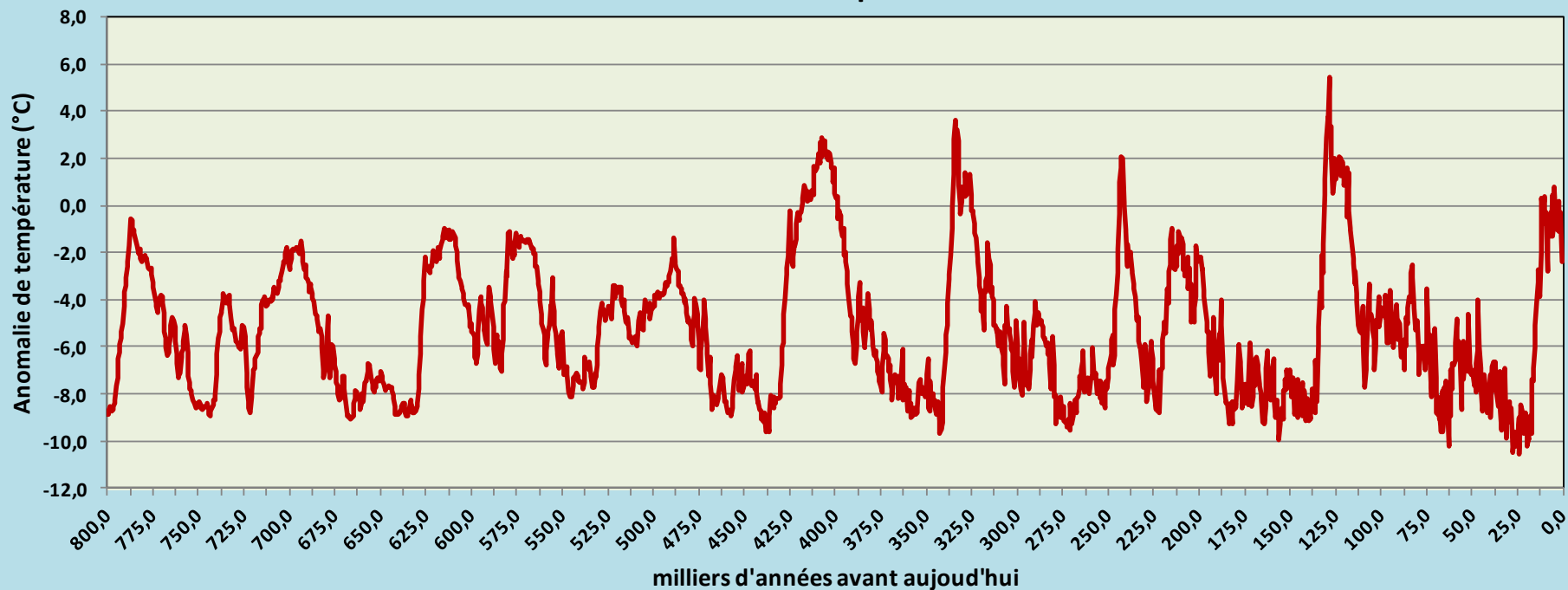
93 % → Océans  
3 % → Cryosphère  
3 % → Continents  
1 % → Atmosphère

Source: GIEC, 2013

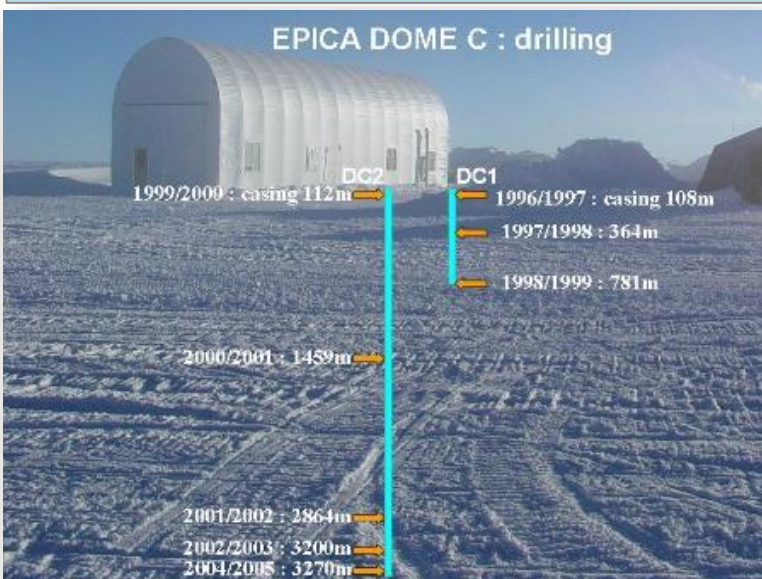
Surface terrestre



## Anomalie de température



### EPICA DOME C : drilling

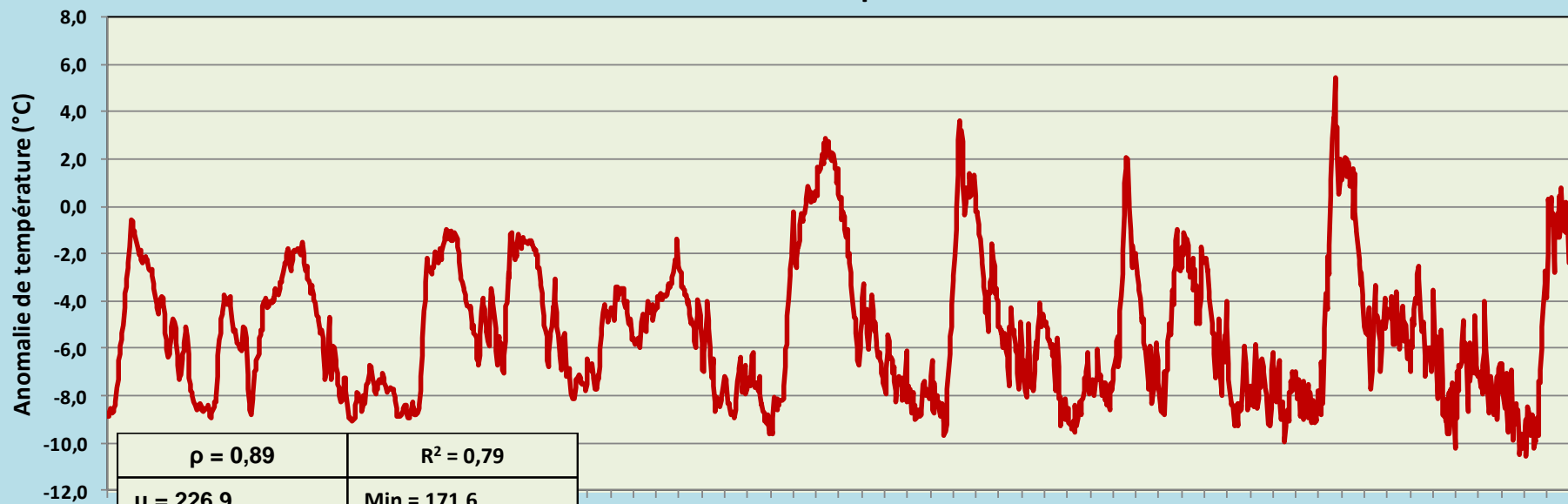


$\mu = -5,3$	Min = -10,6 (-24 000)	
$\sigma = 2,9$	Max = 5,5 (-128 500)	
$P_{10} = -8,6$	$P_{90} = -1,3$	
$Q_1 = -7,7$	$Q_2 = -5,8$	$Q_3 = -3,5$

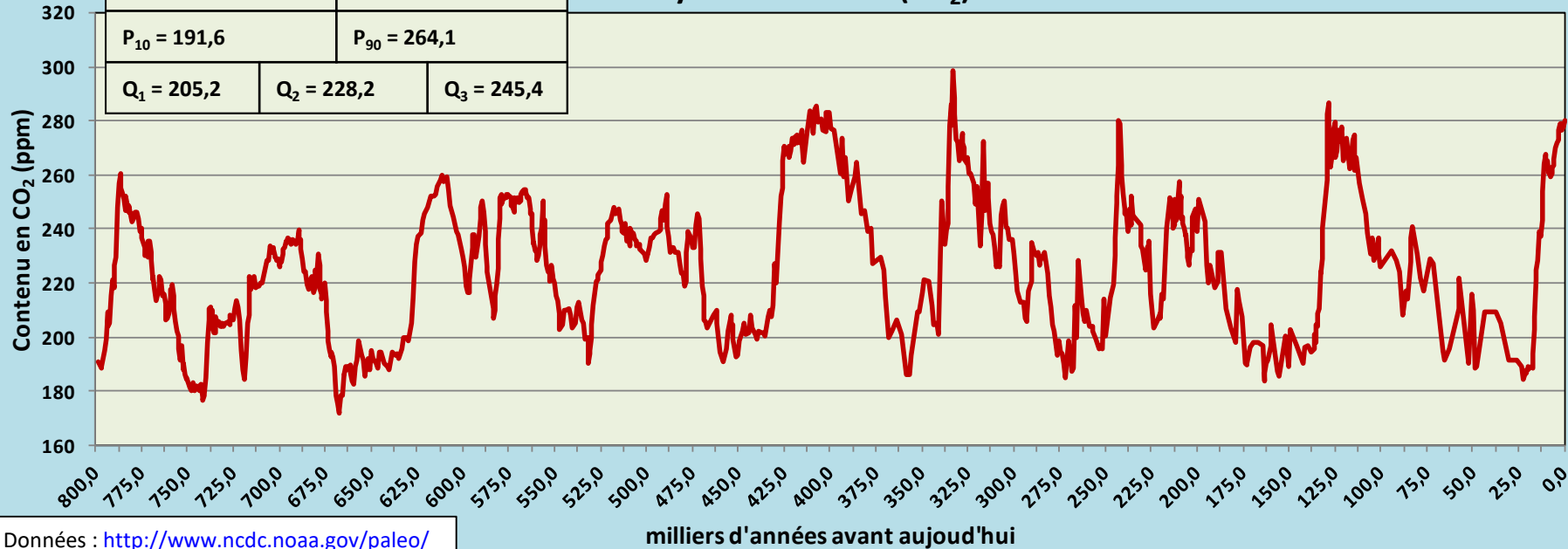
Données: EPICA, NCDC

Excentricité	0,005 à 0,058	0,017 ↓	100 000 ans
Obliquité	22,1° à 24,5°	23,5° ↓	41 000 ans
Précession	axiale	terrestre	22 000 ans
	orbitale		

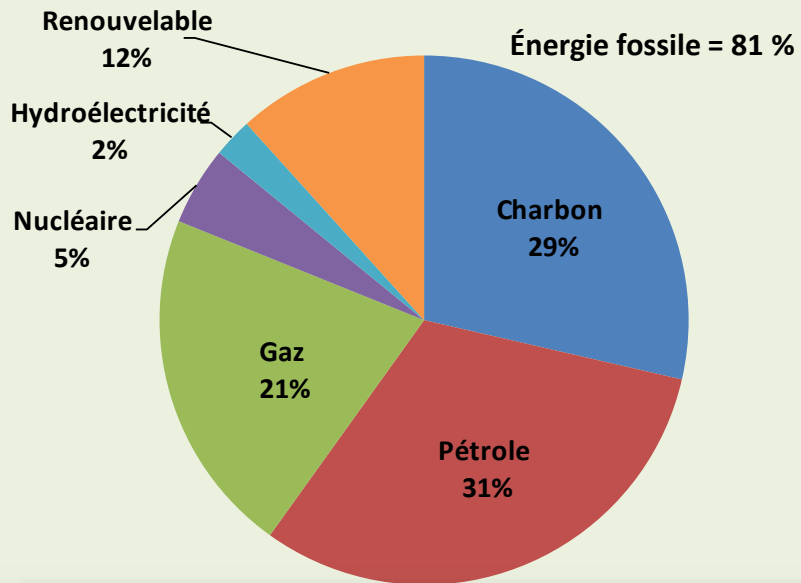
## Anomalie de température



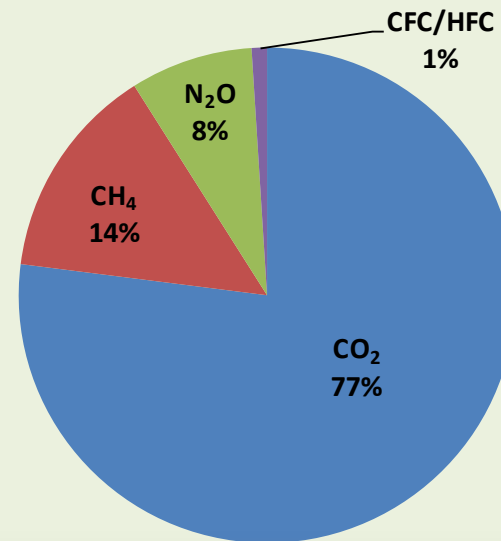
## Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)



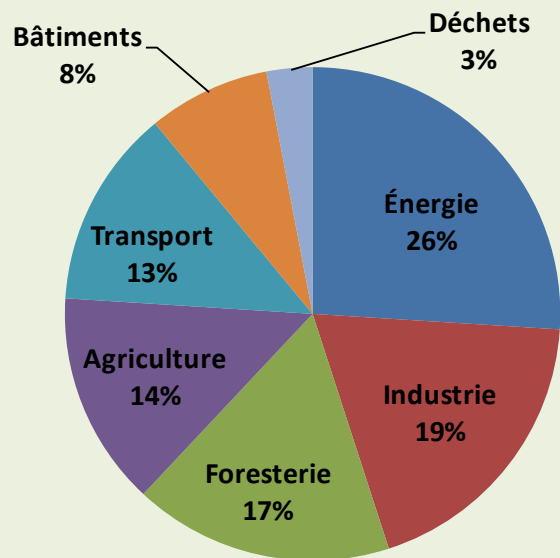
## Sources d'énergie



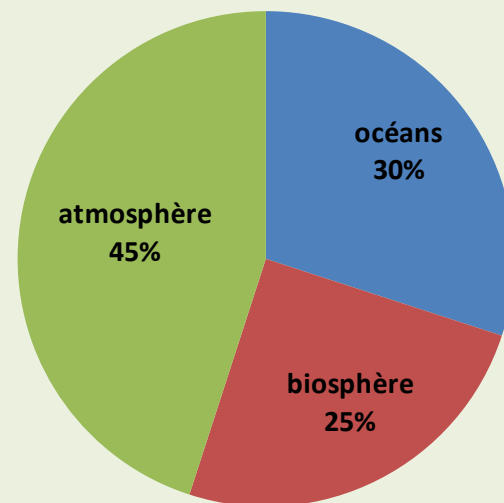
## Gaz à effet de serre



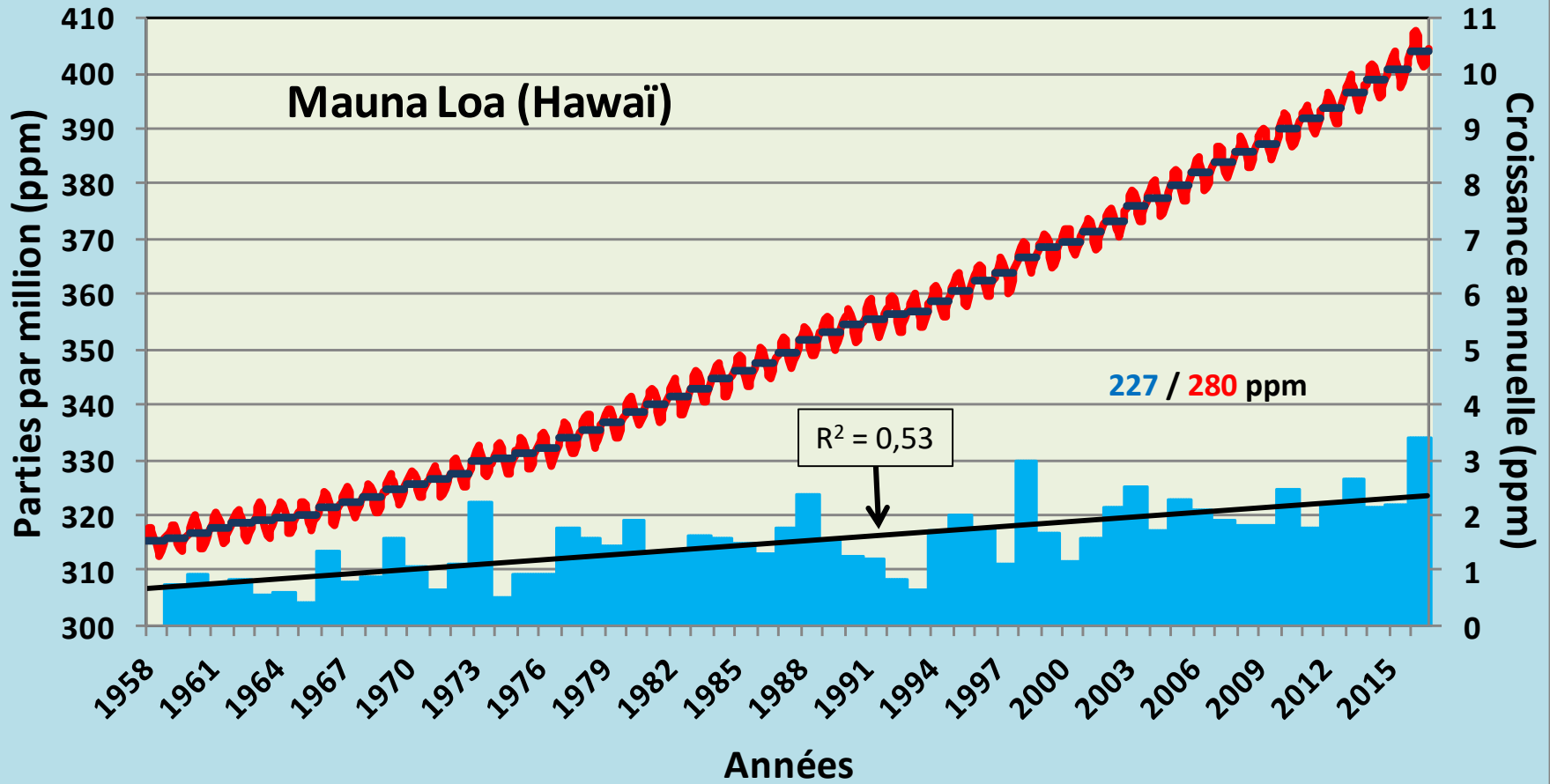
## Émission de gaz à effet de serre



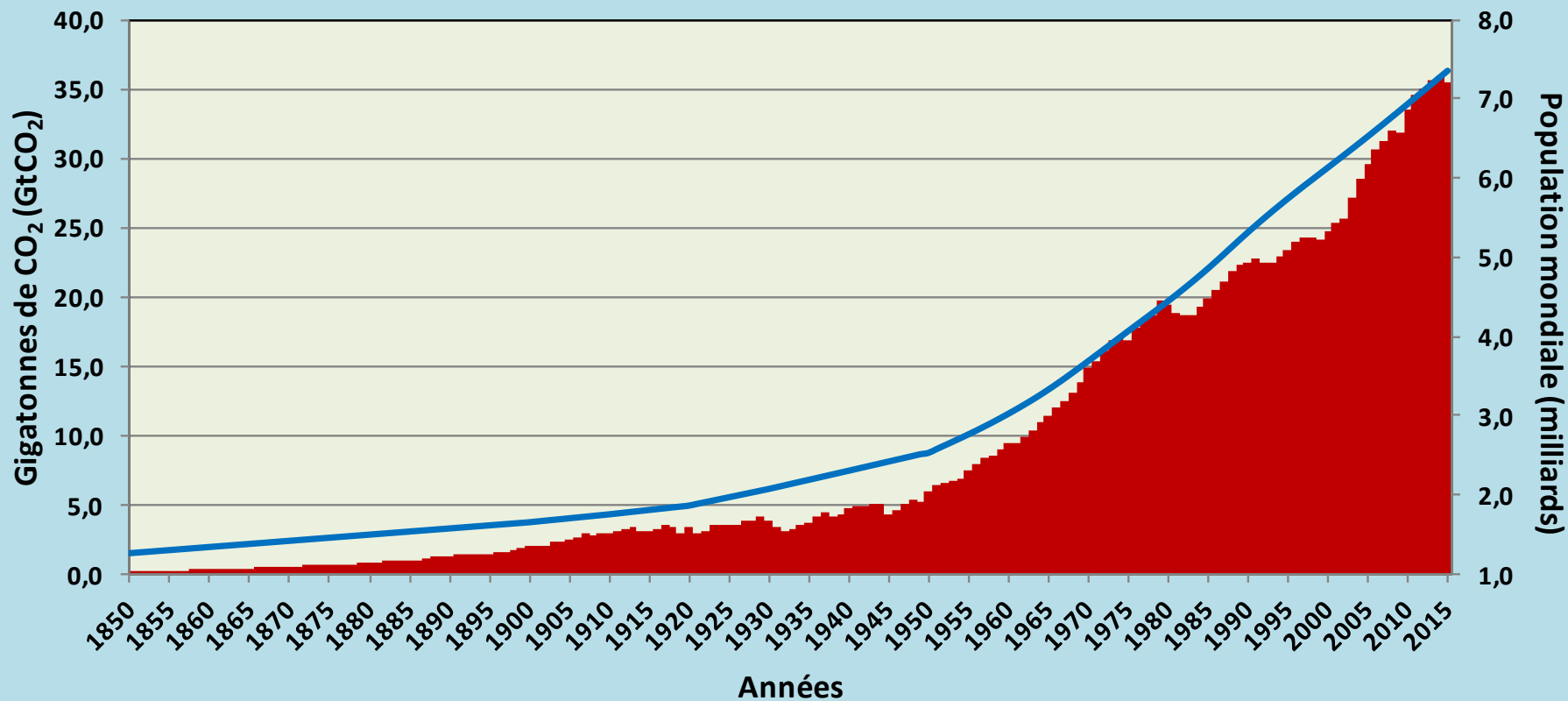
## Absorption du CO<sub>2</sub>



# Rapport de mélange de CO<sub>2</sub>



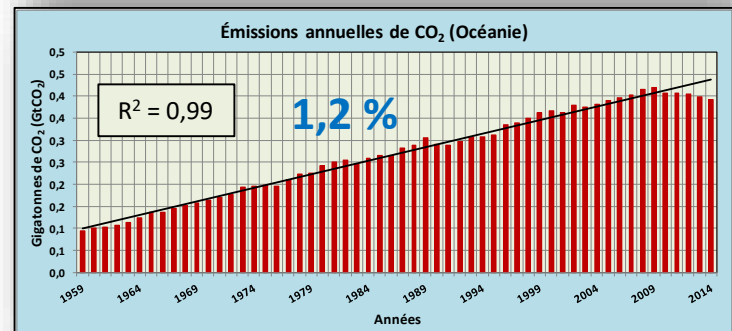
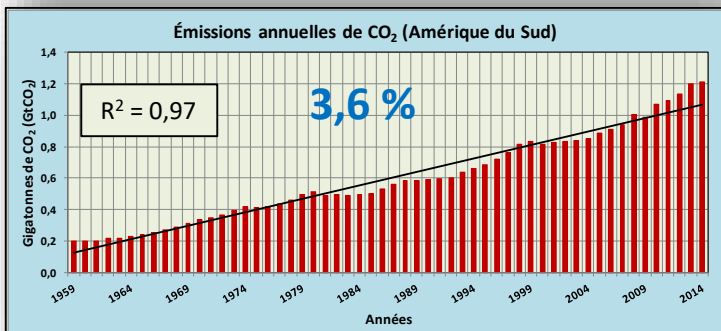
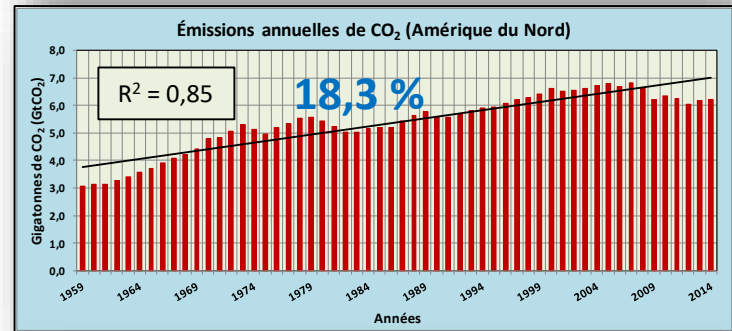
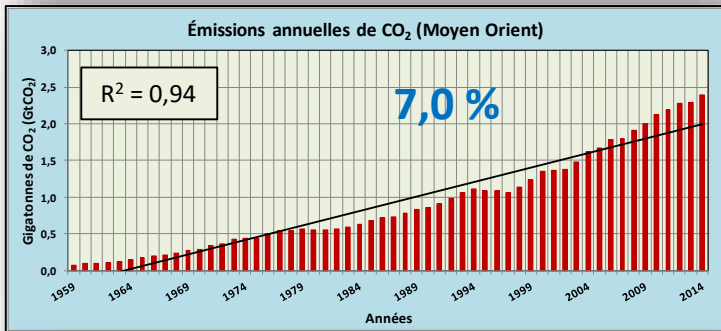
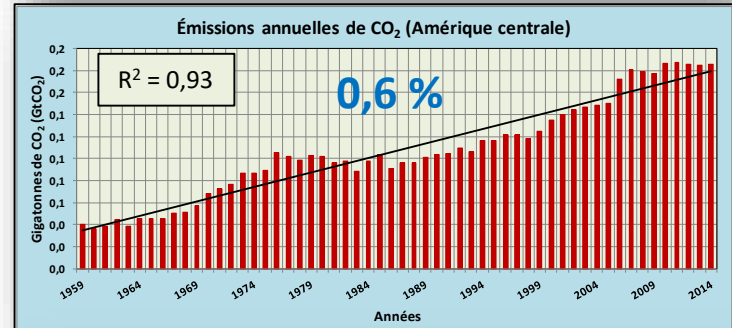
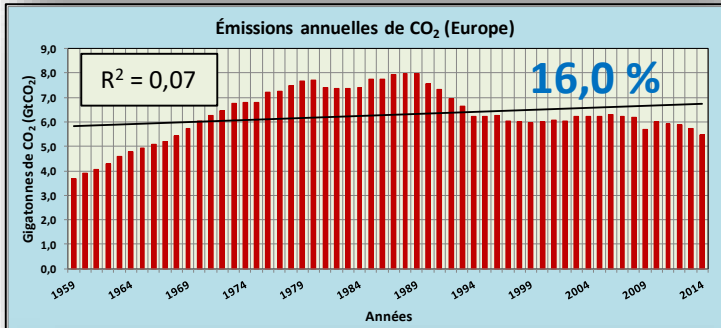
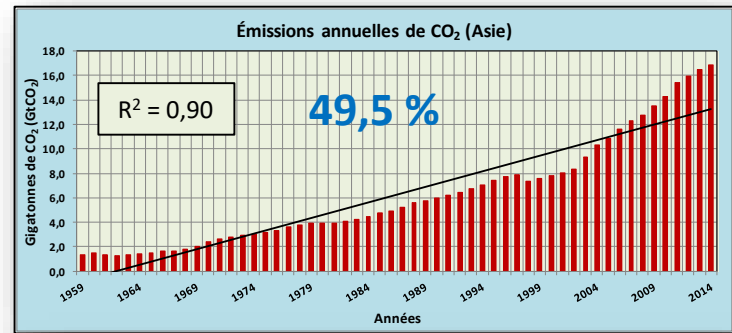
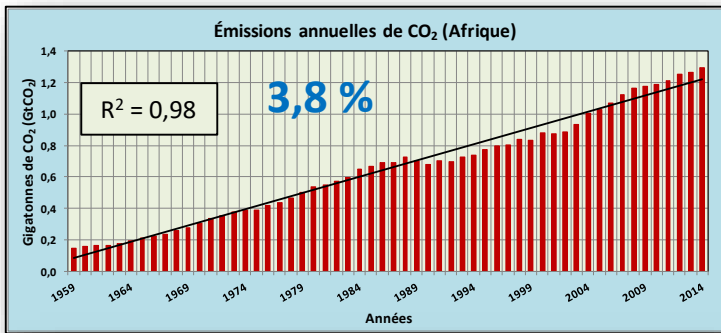
## Émissions mondiales de CO<sub>2</sub>



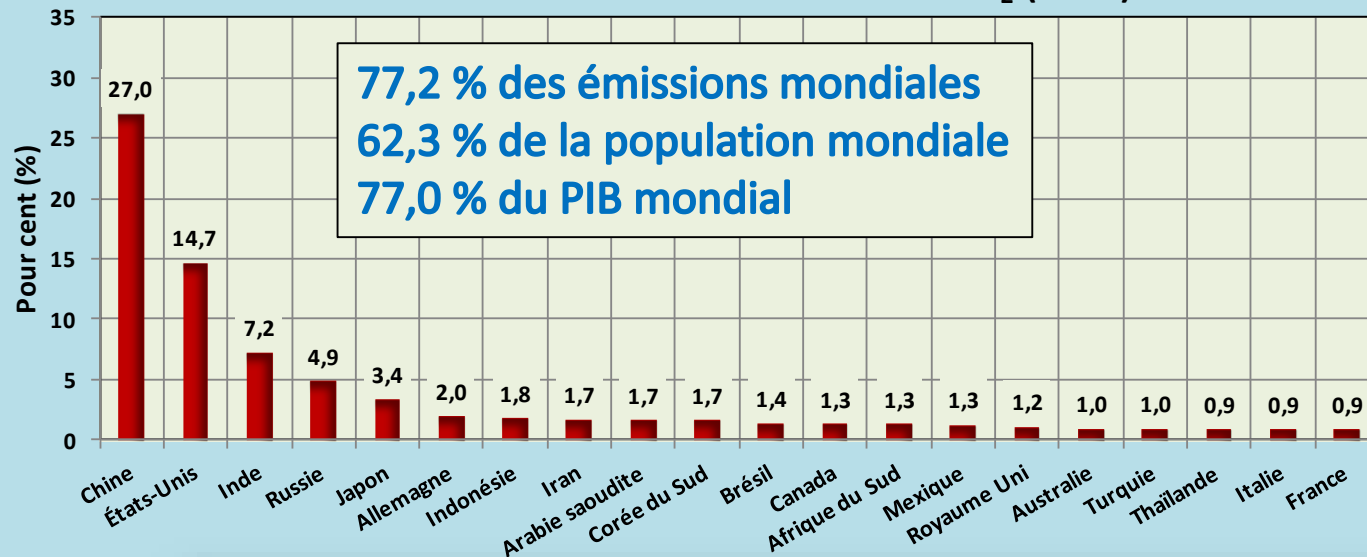
$$\rho = 0,995$$
$$R^2 = 0,991$$

Données : <http://cdiac.ornl.gov>  
<http://www.iea.org>  
<http://www.un.org/esa/population/>

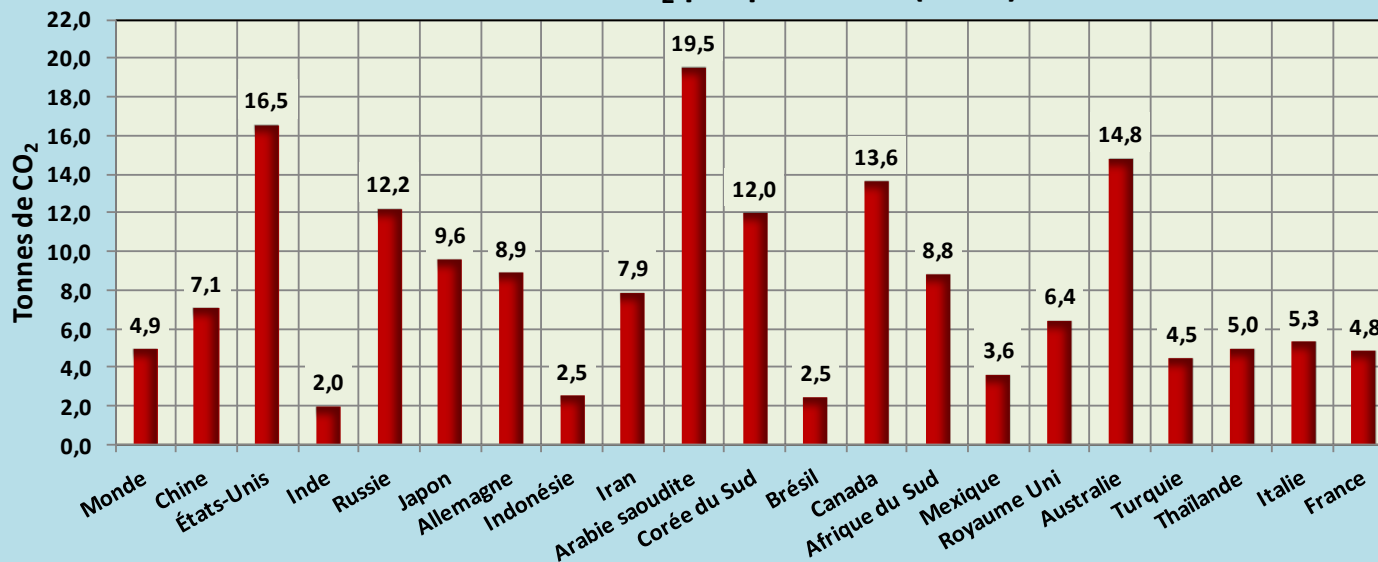




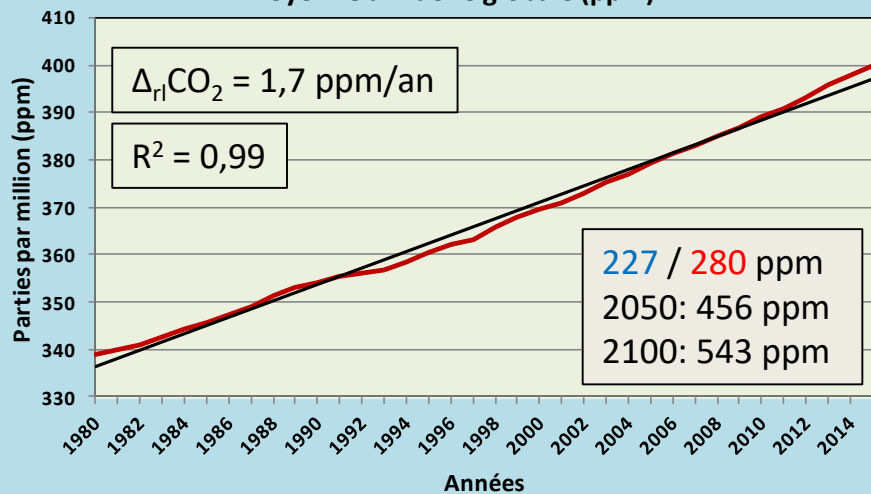
## Contributions aux émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (2014)



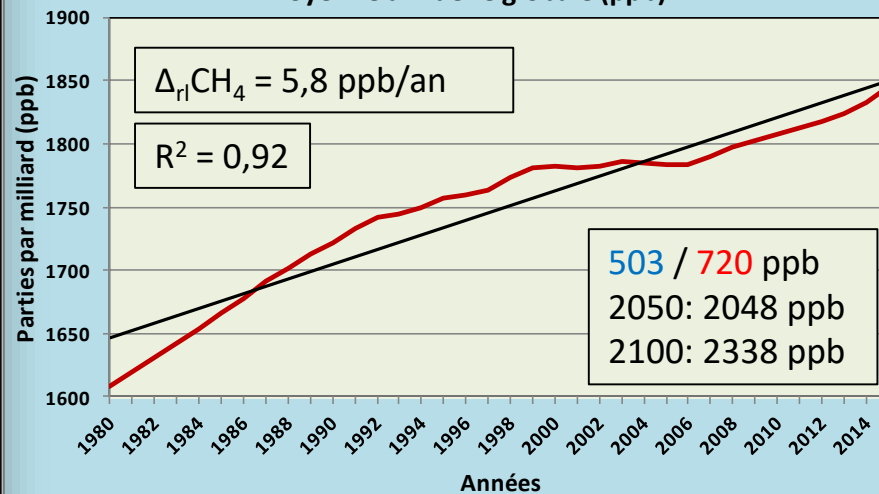
## Émissions de CO<sub>2</sub> par personne (2014)



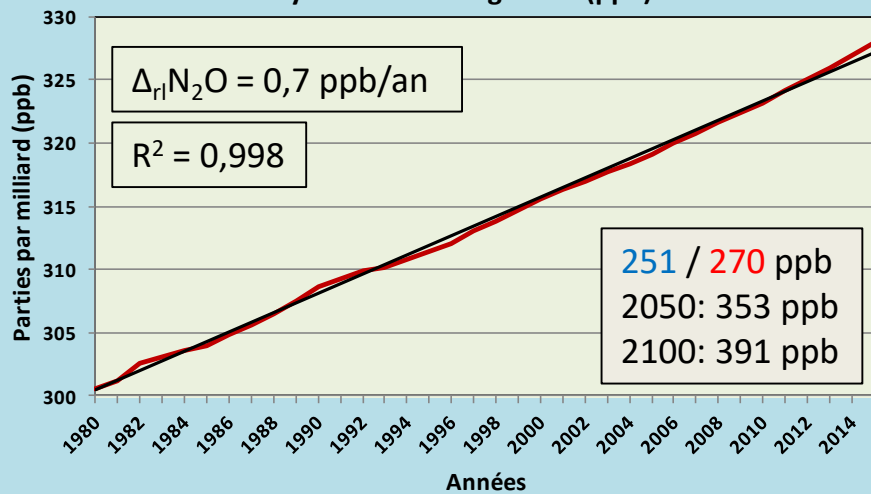
### Rapport de mélange de CO<sub>2</sub> moyenne annuelle globale (ppm)



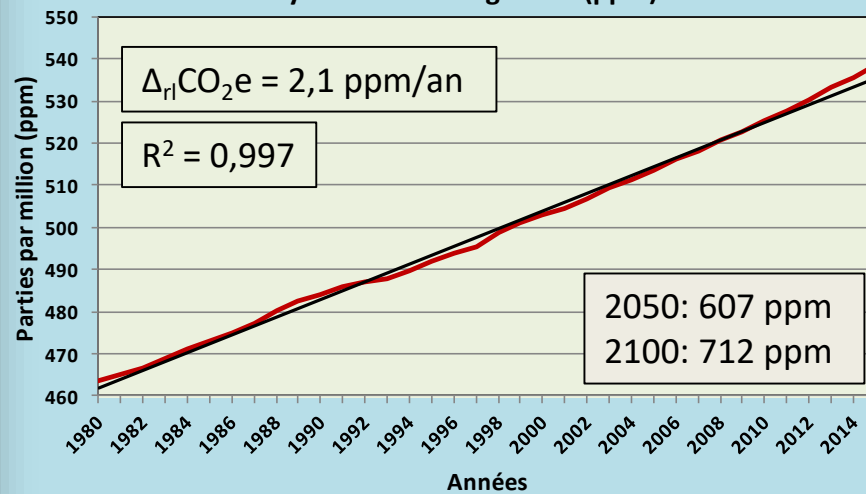
### Rapport de mélange de CH<sub>4</sub> moyenne annuelle globale (ppb)



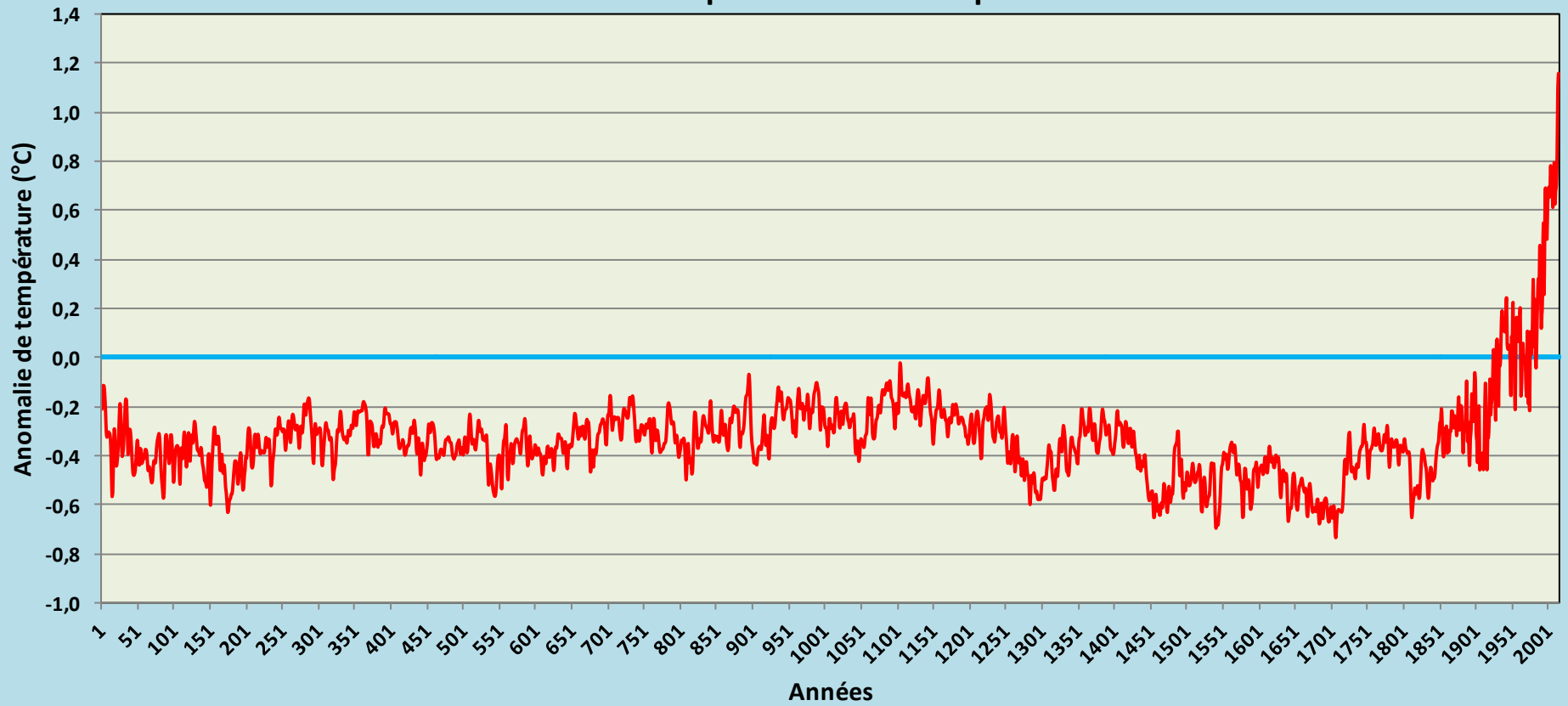
### Rapport de mélange de N<sub>2</sub>O moyenne annuelle globale (ppb)



### CO<sub>2</sub> équivalent (CO<sub>2</sub>e) moyenne annuelle globale (ppm)

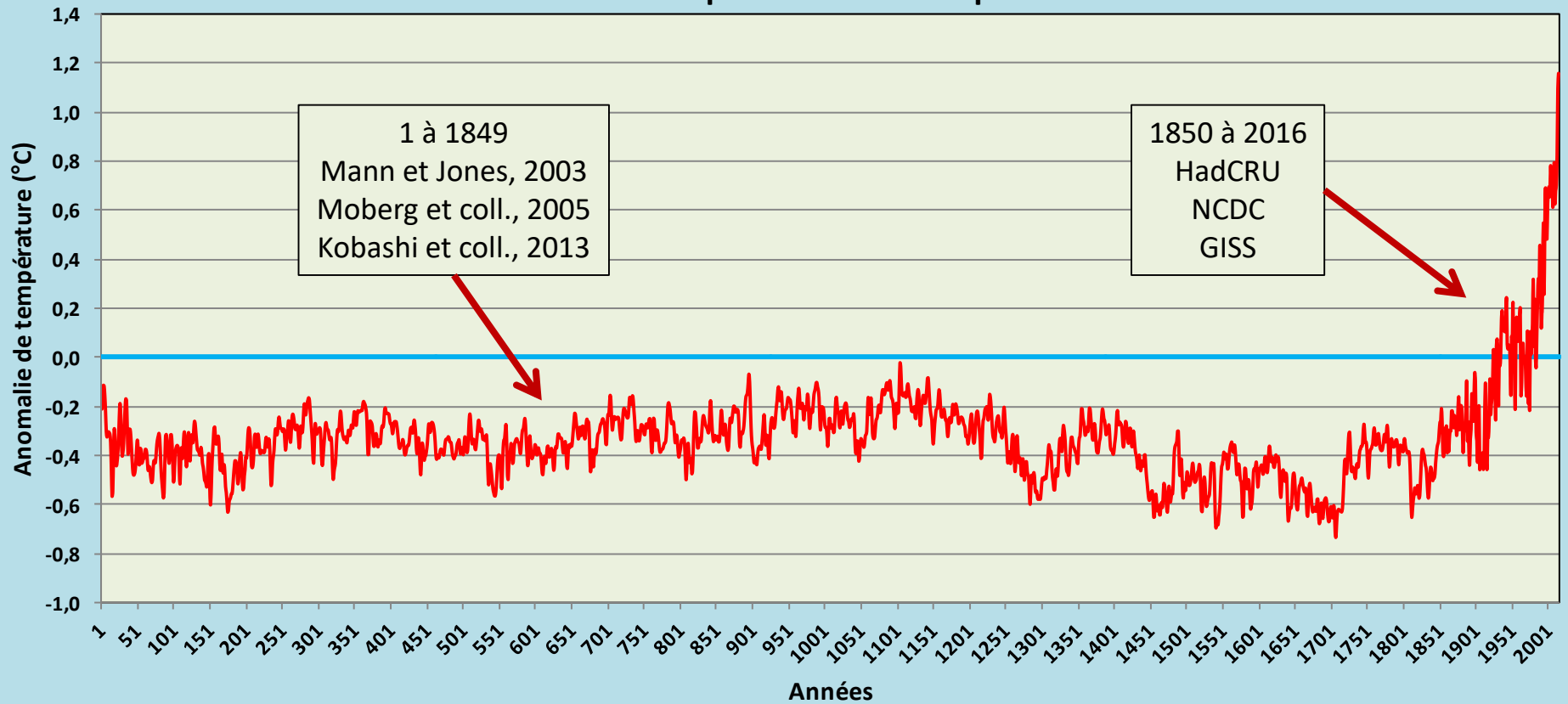


## Anomalie de température — Hémisphère Nord



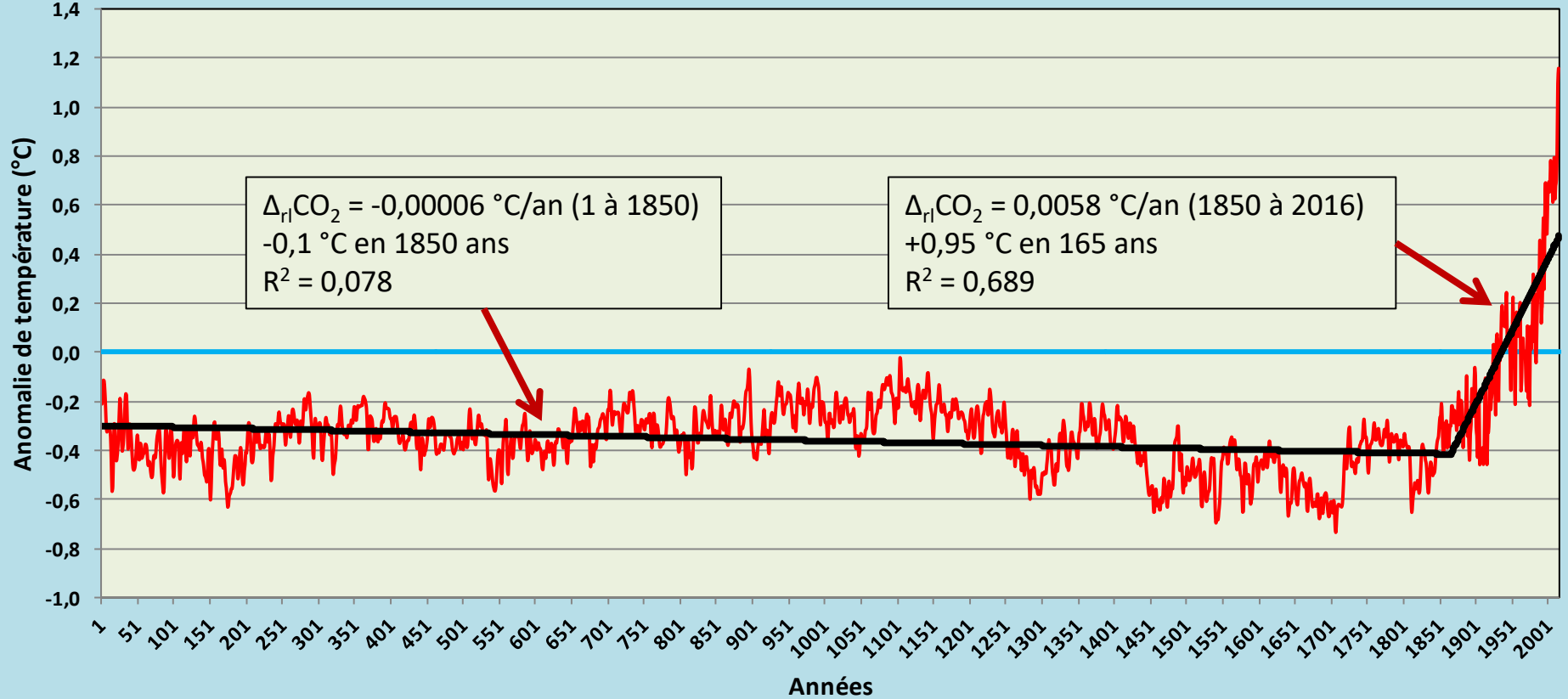
Données : <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>  
<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

## Anomalie de température — Hémisphère Nord



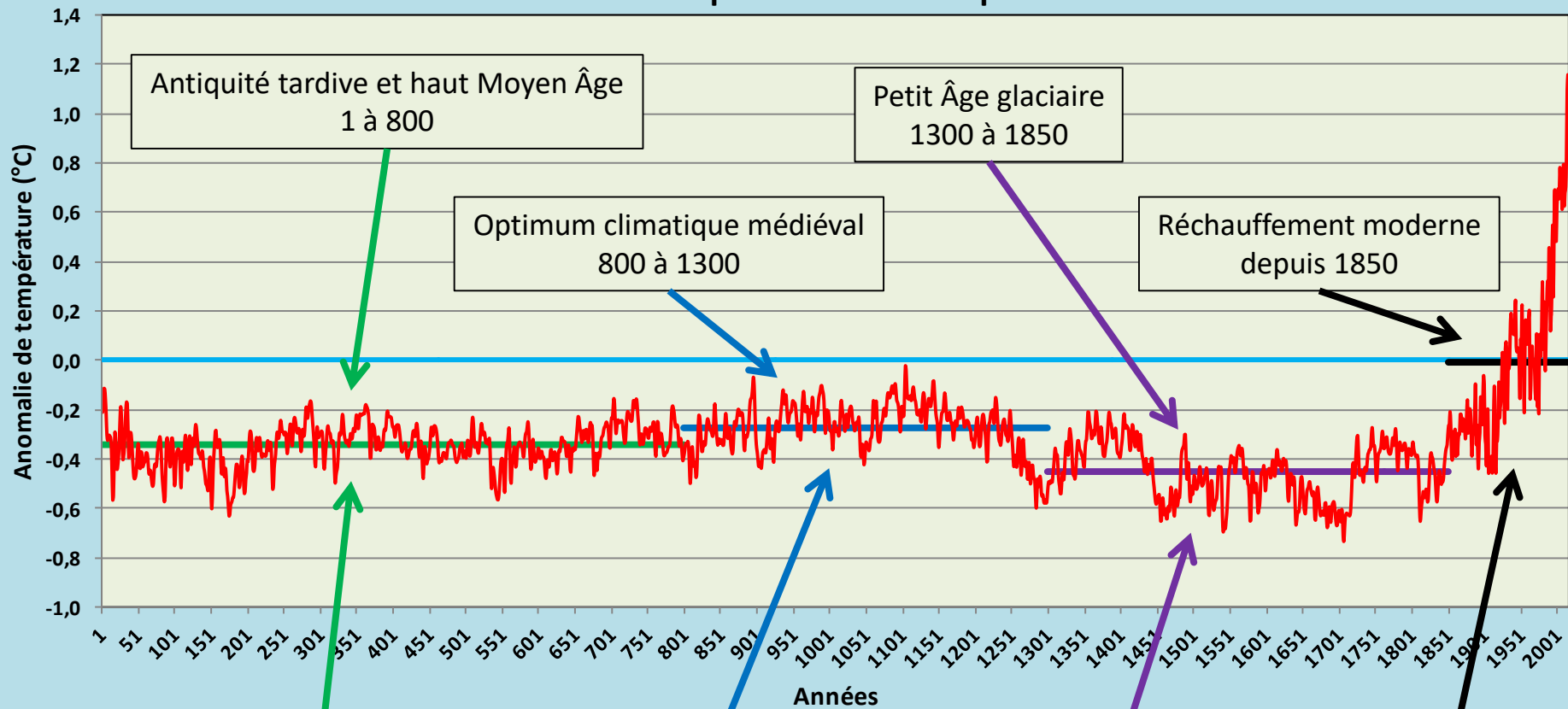
Données : <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>  
<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

## Anomalie de température — Hémisphère Nord



Données : <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>  
<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

## Anomalie de température — Hémisphère Nord



$\mu = -0,345$   
 $\sigma = 0,084$   
 Max =  $-0,112$  (3)  
 Min =  $-0,629$  (175)

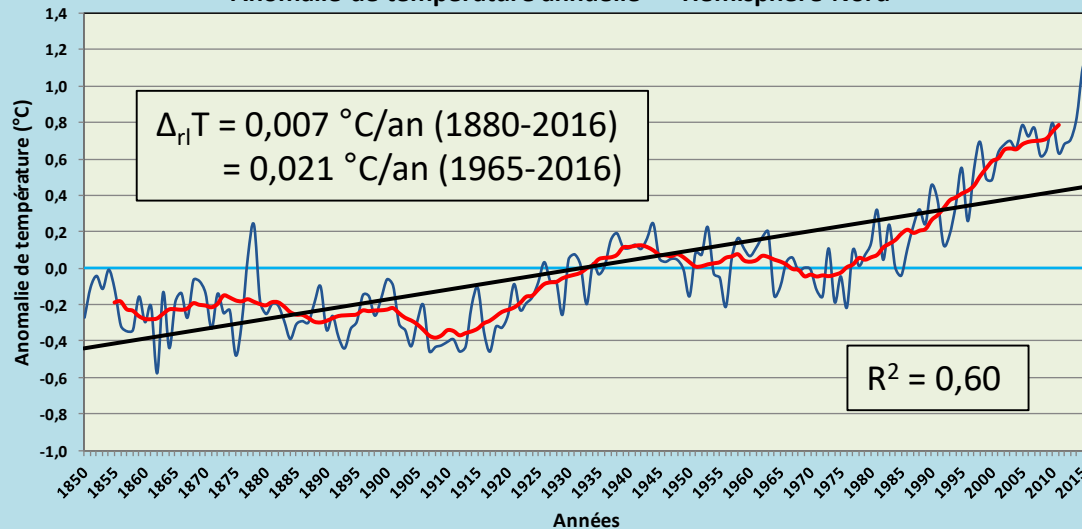
$\mu = -0,271$   
 $\sigma = 0,101$   
 Max =  $-0,021$  (1104)  
 Min =  $-0,597$  (1285)

$\mu = -0,452$   
 $\sigma = 0,112$   
 Max =  $-0,205$  (1367)  
 Min =  $-0,732$  (1708)

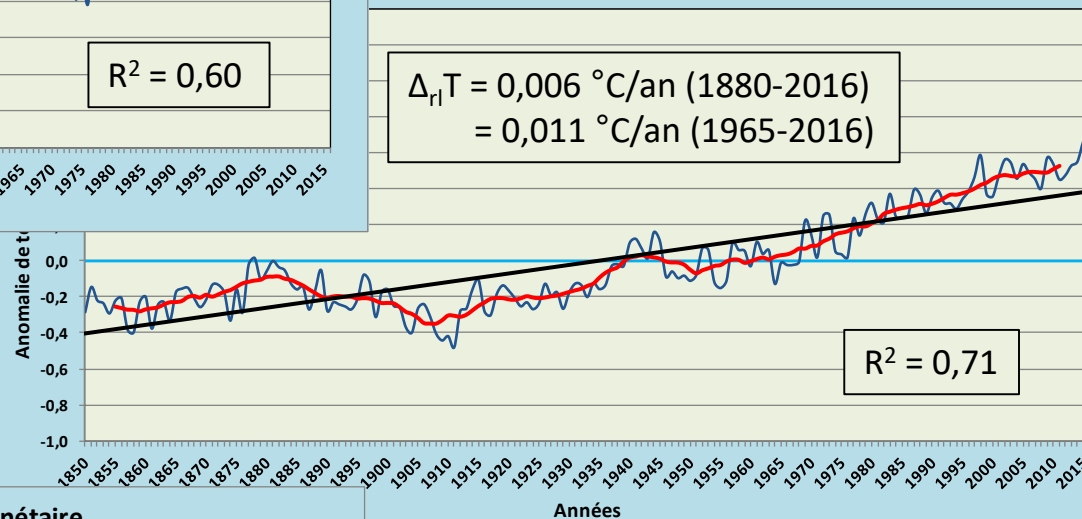
$\mu = -0,009$   
 $\sigma = 0,343$

Données : <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/>  
<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

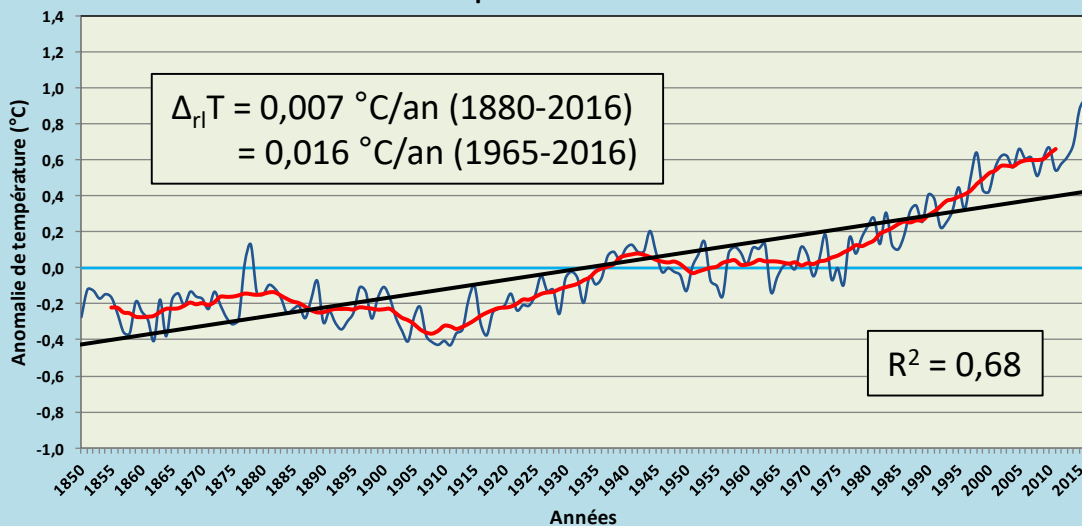
### Anomalie de température annuelle — Hémisphère Nord



### le température annuelle — Hémisphère Sud



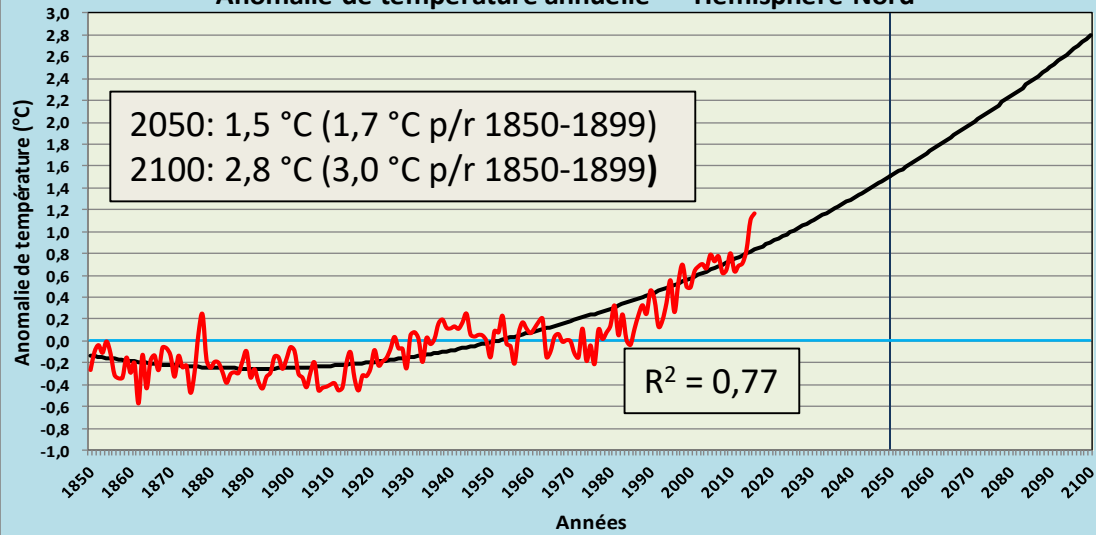
### Anomalie de température annuelle — Planétaire



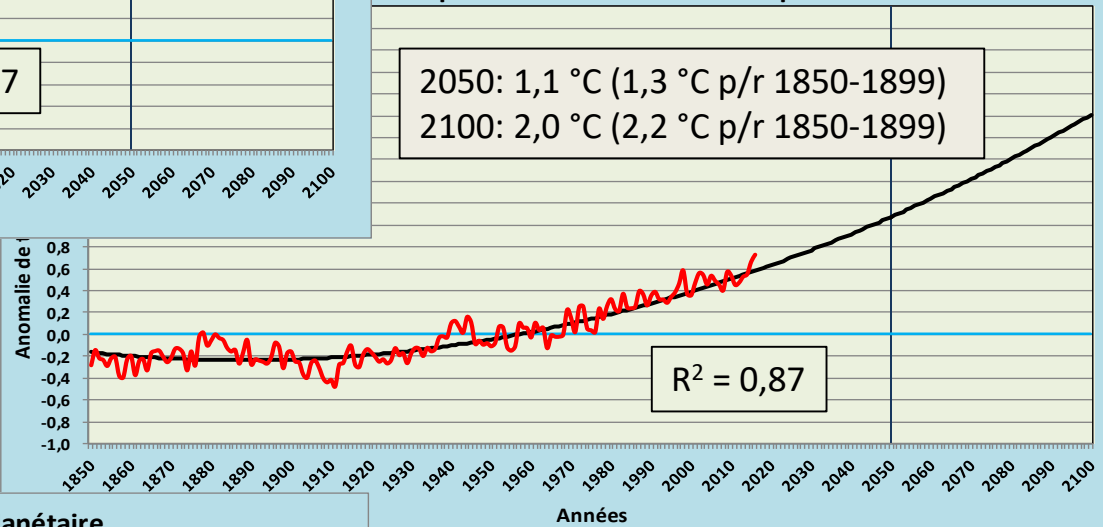
Données : <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>



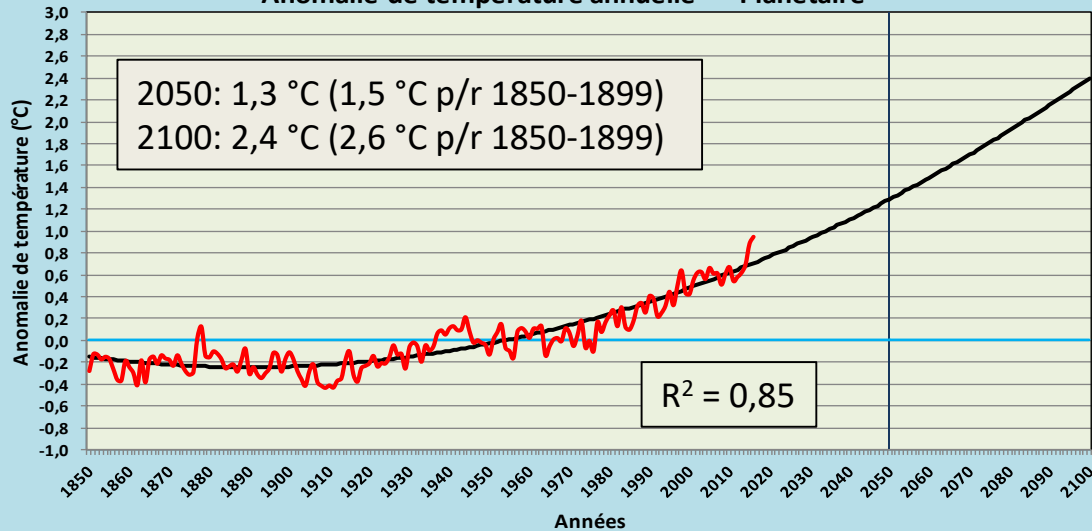
Anomalie de température annuelle — Hémisphère Nord



Anomalie de température annuelle — Hémisphère Sud



Anomalie de température annuelle — Planétaire



Données : <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

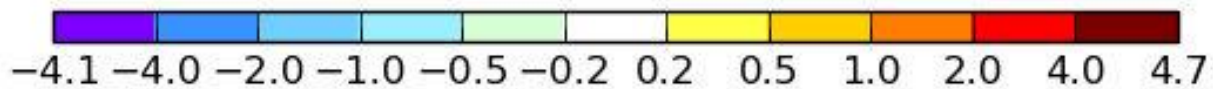
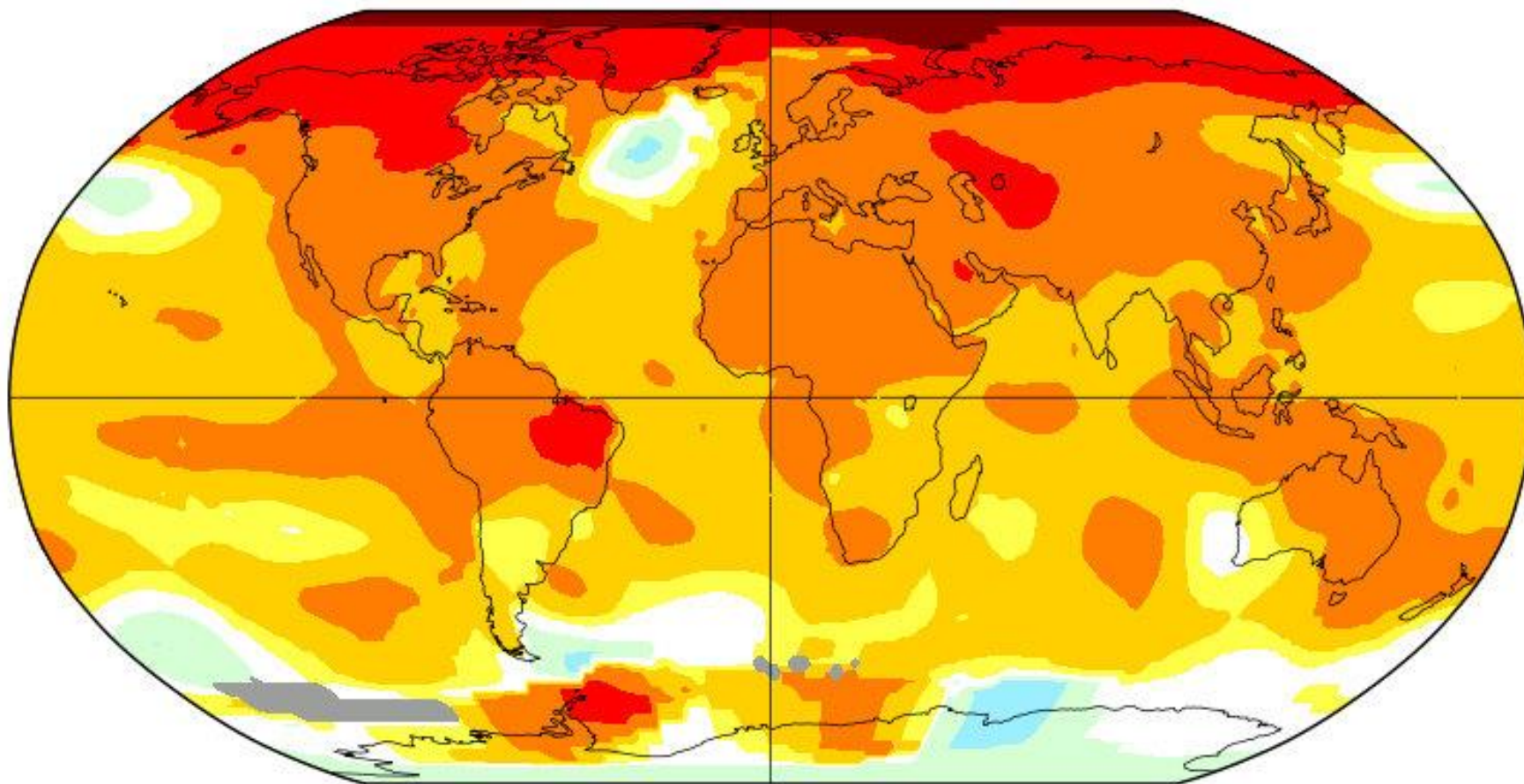
Les dix années les plus chaudes					
Hémisphère Nord		Hémisphère Sud		Planétaire	
Année	Anomalie de température (°C)	Année	Anomalie de température (°C)	Année	Anomalie de température (°C)
2016	1,161 <b>1,384</b>	2016	0,728 <b>0,921</b>	2016	0,944 <b>1,152</b>
2015	1,098	2015	0,663	2015	0,881
2014	0,827	1998	0,585	2014	0,688
2010	0,797	2009	0,570	2010	0,667
2005	0,784	2002	0,560	2005	0,660
2007	0,770	2014	0,549	1998	0,639
2006	0,723	2003	0,543	2003	0,621
2013	0,705	2010	0,538	2002	0,619
2003	0,698	2005	0,536	2013	0,616
1998	0,694	2013	0,527	2007	0,612

Données : <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs>  
<http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php>  
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

Annual J-D 2016

L-OTI(°C) Anomaly vs 1901-2000

1.01

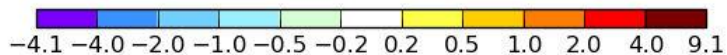
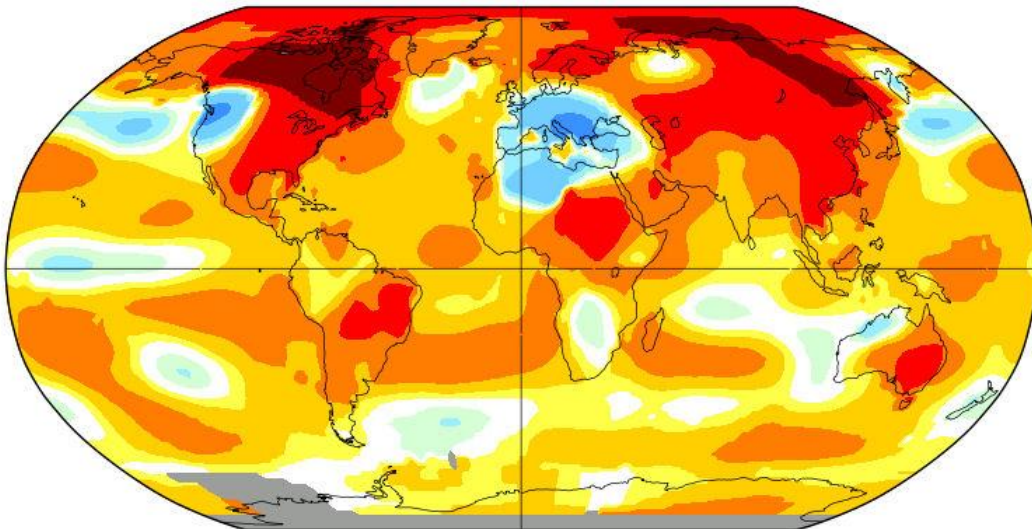


Source : <http://data.giss.nasa.gov/>

January 2017

L-OTI(°C) Anomaly vs 1901-2000

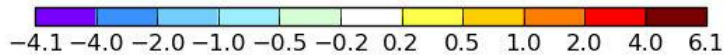
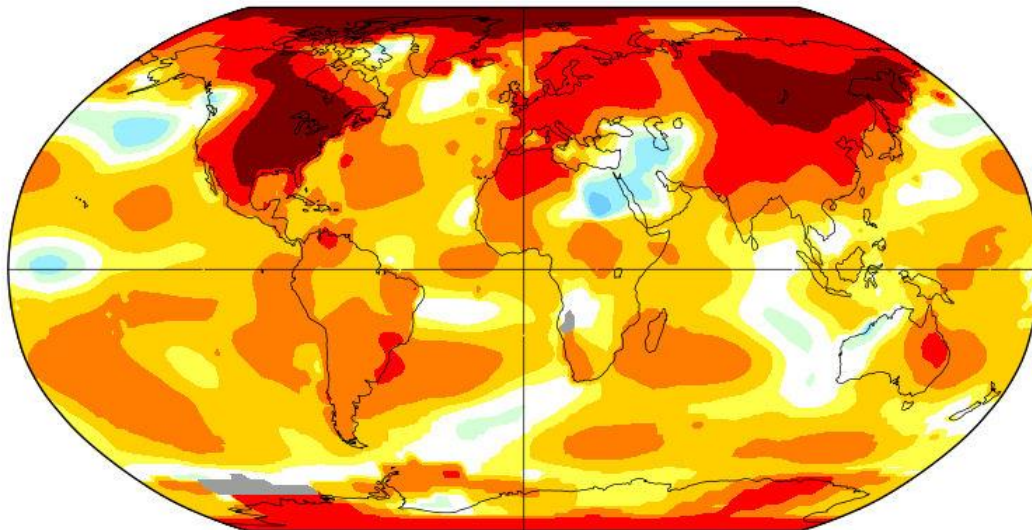
0.94



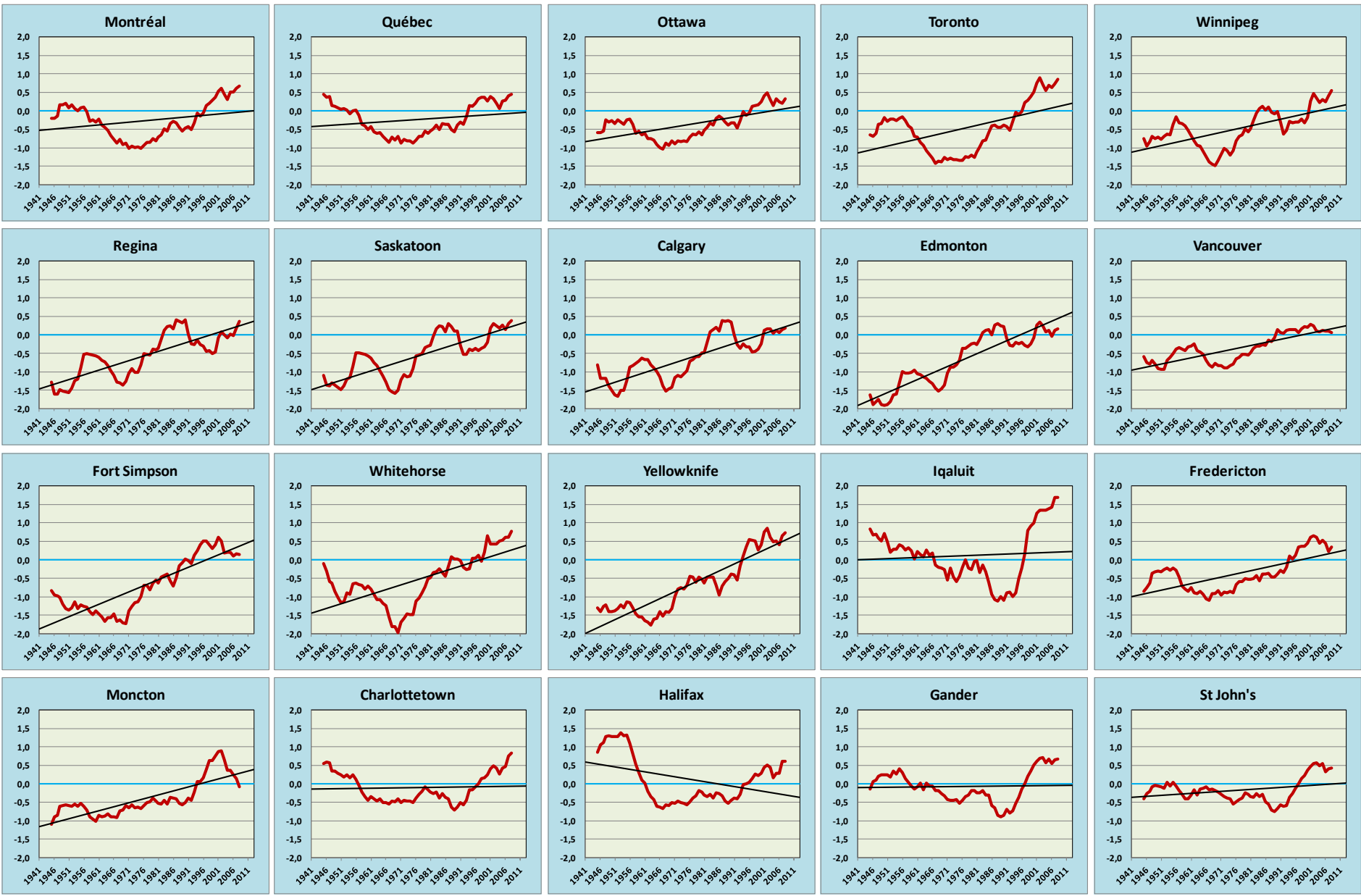
February 2017

L-OTI(°C) Anomaly vs 1901-2000

1.11



Source : <http://data.giss.nasa.gov/>

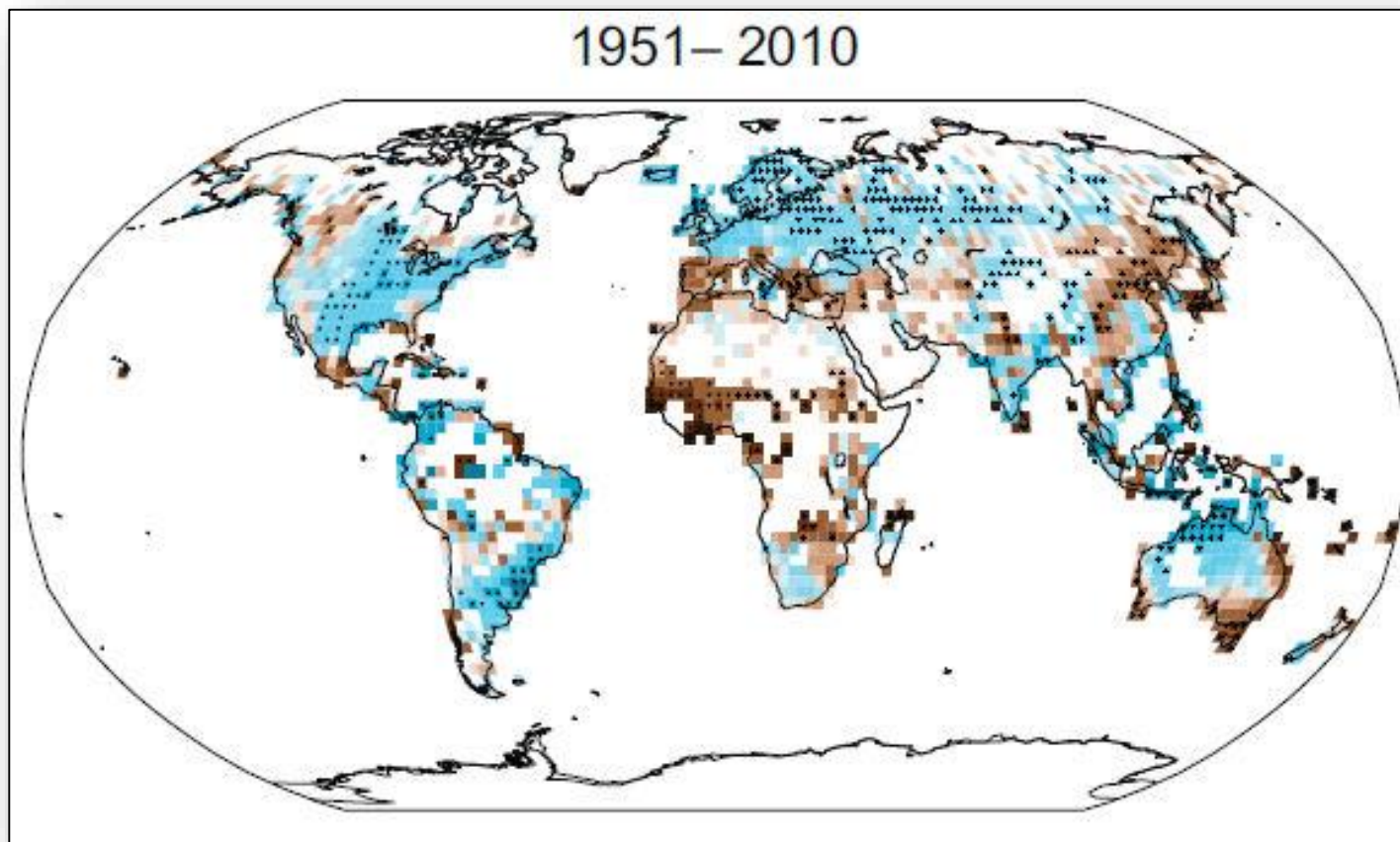


$$\Delta T_{1941-1975} = -0,85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Données : <http://www.meteo.gc.ca>

$$\Delta T_{1975-2013} = 1,36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

# Évolution des hauteurs de précipitations annuelles



-100 -50 -25 -10 -5 -2.5 0 2.5 5 10 25 50 100  
mm/an par décennie

Surface terrestre affectée par la sécheresse/pluviométrie excessive :

20 % (1970) → 38 % (2000)

Surface terrestre affectée par la sécheresse :

12 % (1970) → 30 % (2000)

## Groenland



Âge:	10 millions d'années Glace âgée de 150 000 ans
Superficie:	$1,7 \times 10^6 \text{ km}^2$
Volume:	$2,9 \times 10^6 \text{ km}^3$
Masse:	$2,7 \times 10^{18} \text{ kg}$
Évolution:	$-234 \text{ km}^3/\text{an}$ ( $215 \times 10^{12} \text{ l/an}$ )
PHNMM:	7,1 m

## Antarctique



Âge:	34 millions d'années Glace âgée de 1,5 million d'années
Superficie:	$12,3 \times 10^6 \text{ km}^2$
Volume:	$25,7 \times 10^6 \text{ km}^3$
Masse:	$22,6 \times 10^{18} \text{ kg}$
Évolution:	$-160 \text{ km}^3/\text{an}$ ( $147 \times 10^{12} \text{ l/an}$ )
PHNMM:	59,5 m

## Glaciers Calottes polaires



Superficie:	$0,53 \times 10^6 \text{ km}^2$
Volume:	$0,09 \times 10^6 \text{ km}^3$
Masse:	$0,08 \times 10^{18} \text{ kg}$
Évolution:	$-300 \text{ km}^3/\text{an}$
PHNMM:	0,21 m

## Banquises



Superficie: (moyenne annuelle)	11,9 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (Arctique – 1981-2010) 12,1 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (Antarctique – 1981-2010)
Volume:	0,022 X 10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>
Masse:	0,02 X 10 <sup>18</sup> kg
Évolution:	-0,05 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /an (Arctique – 1979-2016) +0,02 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /an (Antarctique – 1979-2016)
PHNMM:	0 m

## Neige



Superficie: (moyenne annuelle)	24,9X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (Hémisphère Nord – 1981-2010) Andes et Patagonie (Hémisphère Sud)
Volume:	0,003 X 10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>
Masse:	0,003 X 10 <sup>18</sup> kg
Évolution:	-0,03 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> /an (1967-2016)
PHNMM:	0,007 m

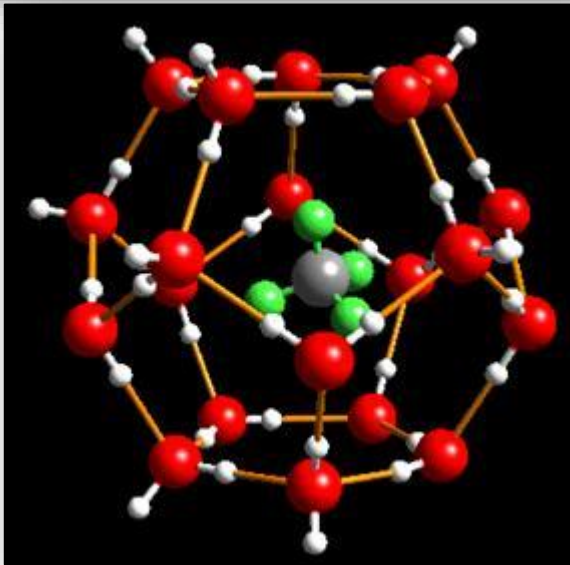
## Pergélisol



Superficie:	22,8 X 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> (Hémisphère Nord) 100 000 km <sup>2</sup> (Hémisphère Sud)
Volume:	4,5 X 10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>
Masse:	4,1 X 10 <sup>18</sup> kg
Évolution:	hausse de 0,3 à 1° C/décennie à 15-20 m
	1,7 X 10 <sup>12</sup> tonnes de carbone organique
PHNMM:	10,8 m



# Clathrates de méthane ou Hydrates de méthane



Molécules de  $\text{H}_2\text{O}$  formant une « cage » autour d'une molécule de  $\text{CH}_4$ .

$4\text{CH}_4 \cdot 23\text{H}_2\text{O}$  (« glace de méthane » ou « glace qui brûle »)

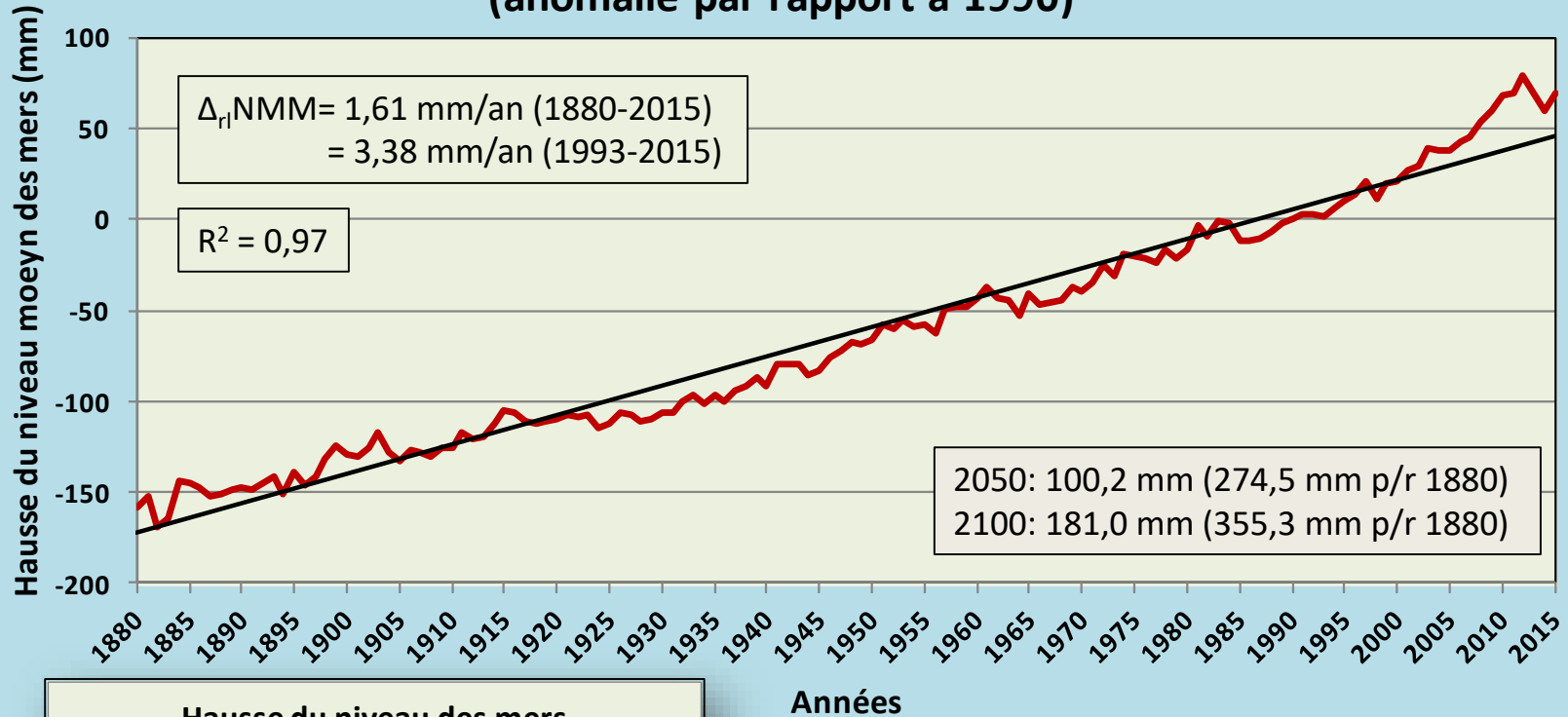
Stables à basse température et à haute pression.

Présents dans les fonds marins, le pergélisol et certains plateaux continentaux.

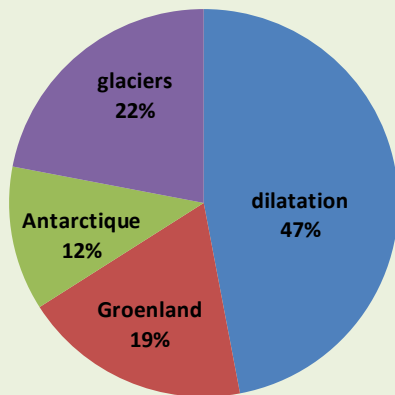
$1 \text{ m}^3$  de clathrates =  $164 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$  à température et pression standards.

$10 \times 10^{12}$  tonnes de carbone ou  $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$  à température et pression standards.

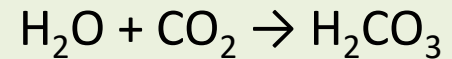
## Hausse du niveau moyen des mers (anomalie par rapport à 1990)



### Hausse du niveau des mers



PHNMM: 77,6 m



$\Delta\text{pH} = -0,02/\text{décennie}$

Données : <http://www.climate.gov/> (NCDC/NOAA)  
<http://www.cmar.csiro.au/>  
<http://www.ipcc.ch/>

- Le niveau global annuel de CO<sub>2</sub> atteindra 456 ppm
  - Le niveau global annuel de CH<sub>4</sub> atteindra 2048 ppb
  - Le niveau global annuel de N<sub>2</sub>O atteindra 353 ppb
- } 607 ppm CO<sub>2</sub>e
- La température globale annuelle sera 0,81 °C plus élevée qu'en 2000.
  - La température globale annuelle sera 1,51 °C plus élevée qu'avant l'ère industrielle.
  - La température sera 4,5 °C à 6,5 °C plus élevée en zones arctiques et subarctiques.
  - Les événements météorologiques violents ou extrêmes seront en hausse importante.
  - Le niveau des mers sera 27,5 cm plus élevé qu'en 1880.
  - Le pH des océans atteindra 8,0 (30 % plus acide qu'avant l'ère industrielle).
  - Les glaciers alpins auront presque tous disparu.
  - La banquise arctique aura presque complètement disparu.
  - L'inlandsis groenlandais aura perdu plus de 10 000 km<sup>3</sup> de glace (entre 2014 et 2050).
  - L'inlandsis antarctique aura perdu plus de 6 500 km<sup>3</sup> de glace (entre 2014 et 2050).
  - Les isothermes auront progressé vers les zones polaires de 200 km (entre 2014 et 2050).
  - La couverture nivale annuelle de l'Hémisphère Nord aura diminué de 4%.
  - La moitié de la forêt amazonienne aura disparu.
  - Le tiers des espèces vivantes par rapport à 2000 aura disparu.
  - La grande barrière de corail aura presque complètement disparu.
  - La population mondiale atteindra les 9,5 milliards de personnes.
  - Le nombre de réfugiés environnementaux dépassera les 210 millions (2,3% de la population).
  - La prolifération des maladies infectieuses et parasitaires sera en rapide croissance.
  - L'humanité aura besoin de deux planètes Terre pour subvenir à ses besoins.

**N'oubliez pas que vous faites partie  
de la Nature, mais qu'elle ne  
vous appartient pas.**

Grey Owl (Archibald Belaney)  
*Récits de la cabane abandonnée*

