



CENTRE D'ETUDES  
ET DE RECHERCHES  
TECHNOLOGIQUES EN  
MICROELECTRONIQUE  
(CERTeM)

# L'énergie

## et l'avenir énergétique

*2012 : Année internationale de l'énergie durable pour tous*

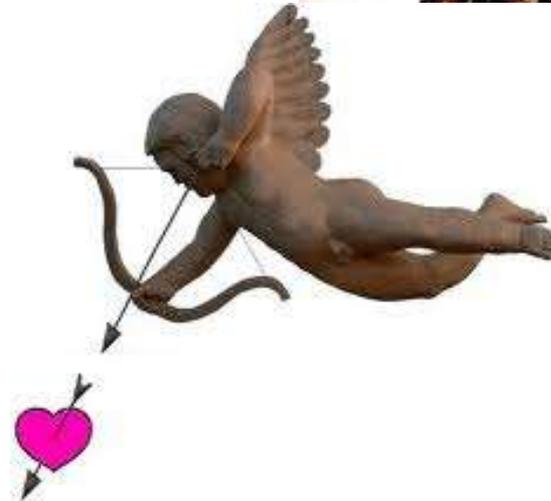
## Energie : une notion floue et un terme ambigu

- Faire le plein d'énergie avec des huiles essentielles...
- Energie cinétique
- Energie potentielle
- Energie = « travail » d'une force
- Energie d'une onde électromagnétique
- Energie produite, fossile, durable
- Energie consommée et facturée...
- Energie thermique = chaleur
- Conversion d'énergie



# Energie potentielle et énergie cinétique

- Arc au repos : énergie nulle
- Arc bandé : énergie potentielle proportionnelle à l'allongement du bras  
(travail d'une force)
- La flèche part avec une énergie cinétique  
= masse x vitesse x vitesse



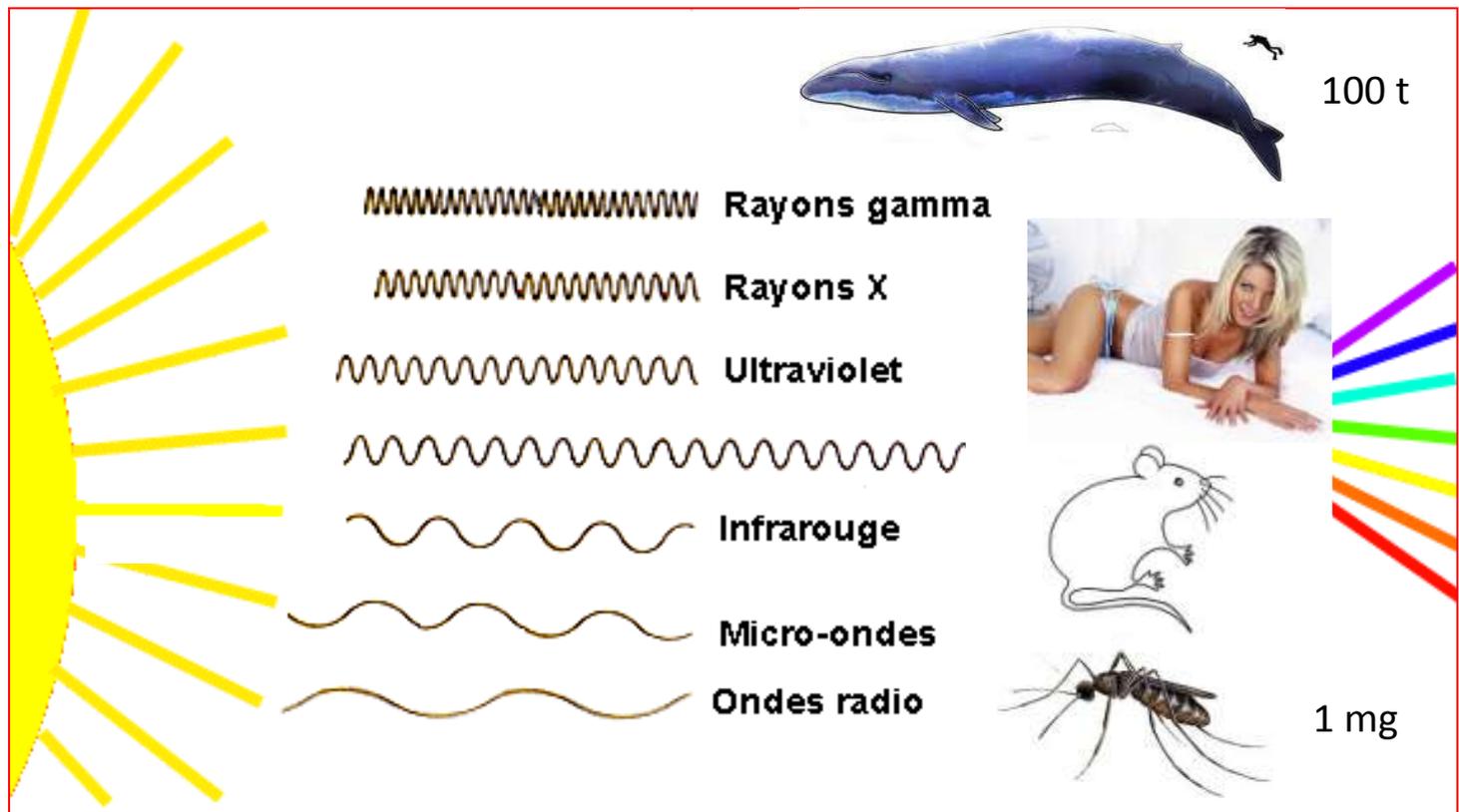
# Energie d'une onde électromagnétique

Energie proportionnelle à la fréquence

Fréquence = nombre d'oscillations par seconde

Les rayonnements les plus énergétiques (radioactifs) : X, gammas

**Nous émettons infrarouges (hectowatts) et gammas (nanowatts)**



# Energie électrique consommée et facturée...

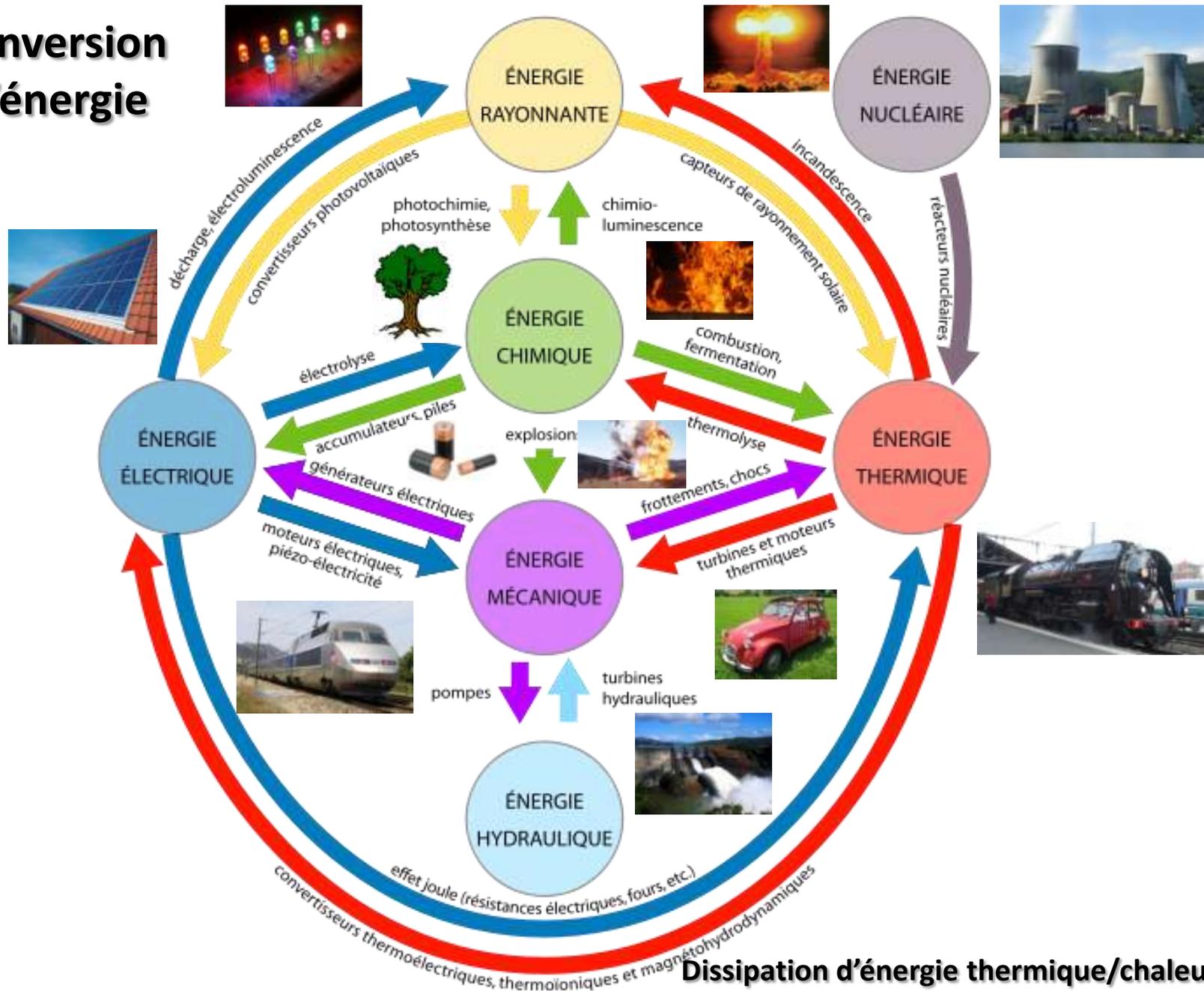
Énergie = puissance (W) x  
temps (seconde)

1 joule = 1 watt x 1 sec

1 kilowattheure = 1000 x  
3600 = 3,6 10<sup>6</sup> joules



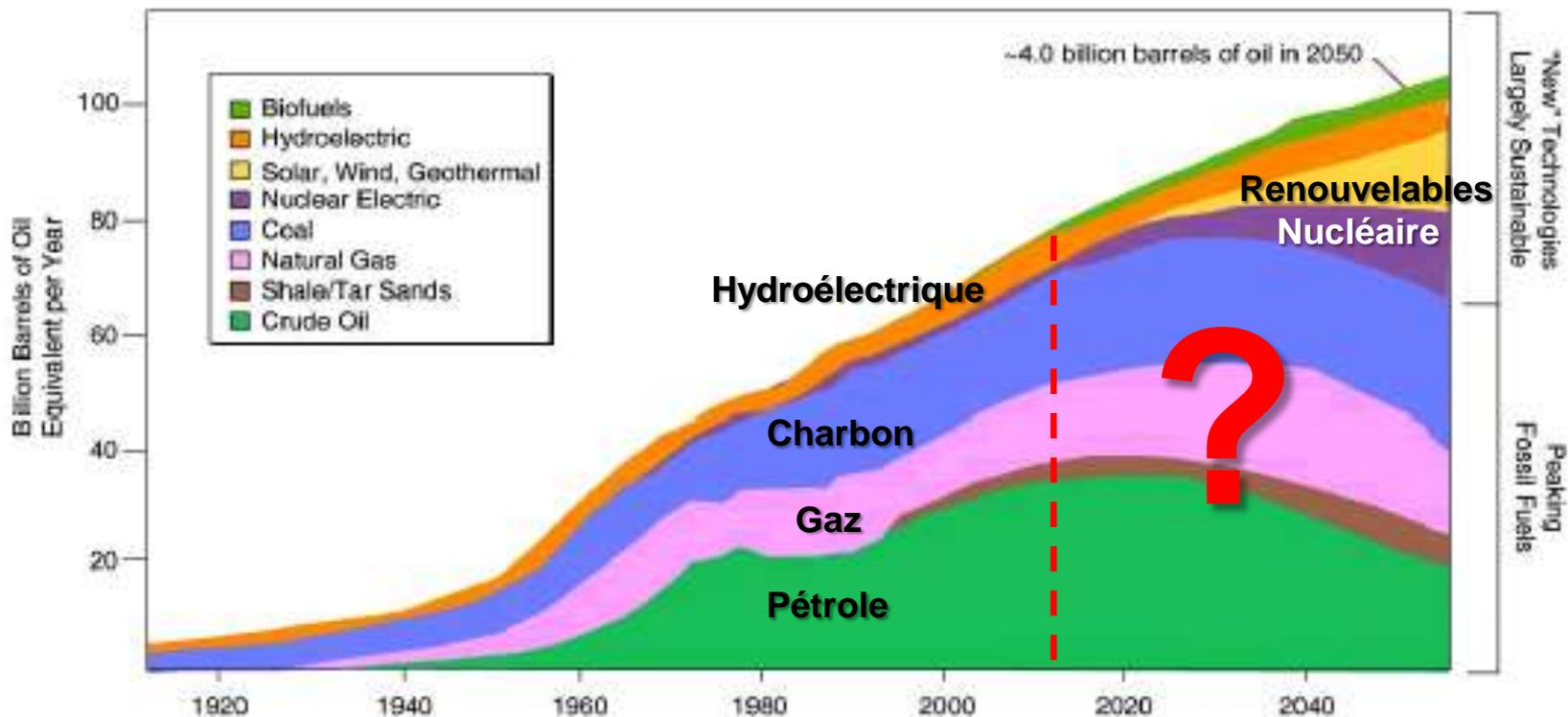
# Conversion d'énergie



**Dissipation d'énergie thermique/chaueur lors des conversions à mauvais rendement**

# Energie : consommation et projections (hors biomasse)

World Energy Demand—Long-Term Energy Sources

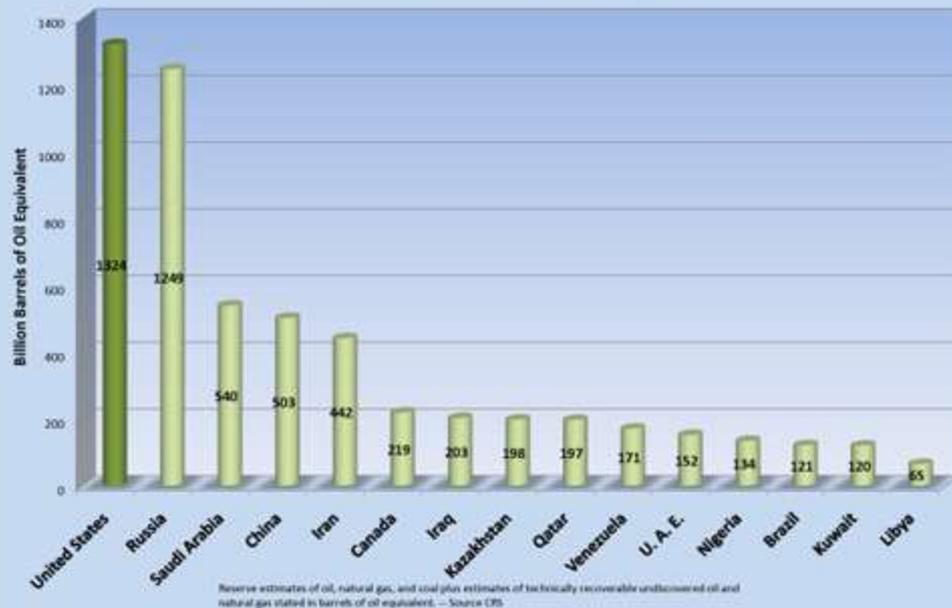


Sources: Lynn Orr, *Changing the World's Energy Systems*, Stanford University Global Climate & Energy Project (after John Edwards, American Association of Petroleum Geologists); SRI Consulting.

- Plus de 90 % de la dépense d'énergie actuelle est liée aux combustibles fossiles – ce n'est évidemment pas durable

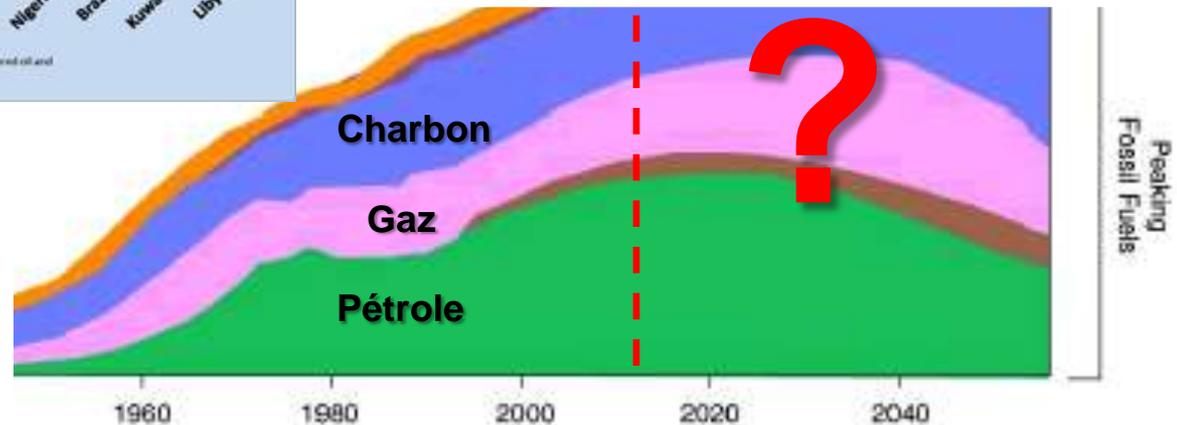
## World Fossil Fuel Resources

America Leads in Recoverable Fossil Fuel Supplies



**France en 2011** – Grâce à une année clémente, 90 % de *l'électricité* a été produite par nucléaire, hydroélectrique, éolien et photovoltaïque (« décarbonée »). *Éolien et photovoltaïque ont compté pour 2,5 %, soit 1 % de l'énergie totale.*

En 1988, 45 ans de réserves mondiales de pétrole prouvées, en 2009, 46 ans



of Energy Systems, Stanford University Global Climate & Energy Project  
(an Association of Petroleum Geologists); SRI Consulting.

- Plus de 90 % de la dépense d'énergie actuelle est liée aux combustibles fossiles – ce n'est évidemment pas durable

# Alternative à « produire toujours plus d'énergie » mieux l'utiliser : efficacité énergétique

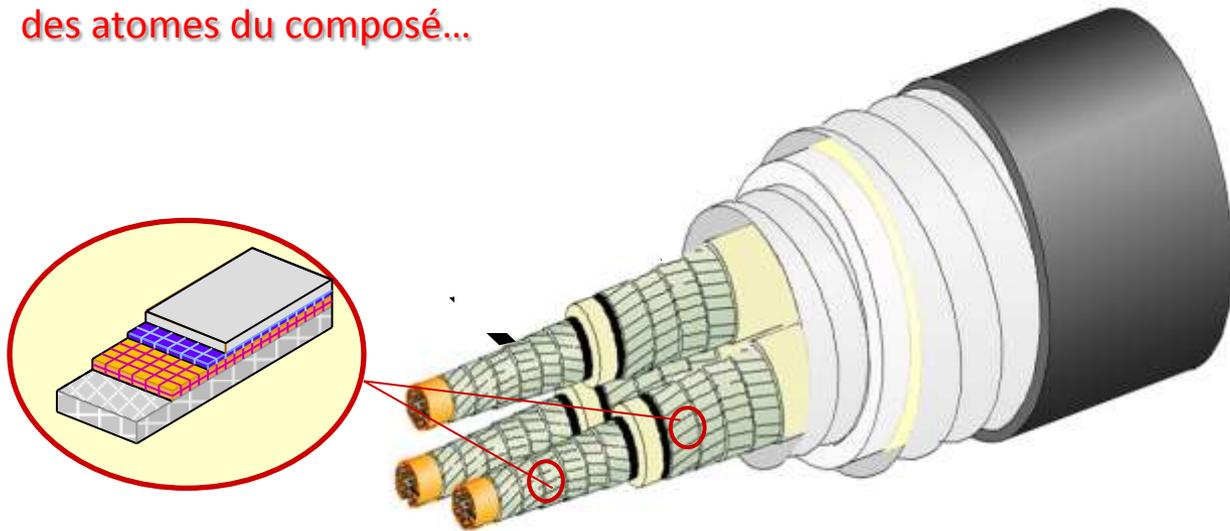
- Meilleure isolation des bâtiments
- Pompes à chaleur
  - COP jusqu'à 7
- Cogénération (chauffage gratuit...)
- Vers de meilleurs rendements de la conversion de puissance électrique de courant continu -> alternatif DC/AC (« inverter » ou onduleur) et alternatif -> continu AC/DC (redresseur) - Pôle S2E2
- Supprimer les pertes dans le transport d'électricité grâce aux matériaux supraconducteurs ?



Utiliser des câbles supraconducteurs refroidis à la température d'ébullition de l'azote (-196°C) pour distribuer le courant électrique (lignes prototypes aux USA)



L'oxygène, ressource gratuite, constitue plus de la moitié des atomes du composé...



## La plus développée des énergies renouvelables pour produire l'électricité : l'hydroélectrique



Le barrage des 3 gorges sur le Yang Tse Kiang  
(habitations de 1,5 million de personnes détruites et reconstruites plus haut)

En 2000, il existait plus de 45000 grands barrages dans 150 pays

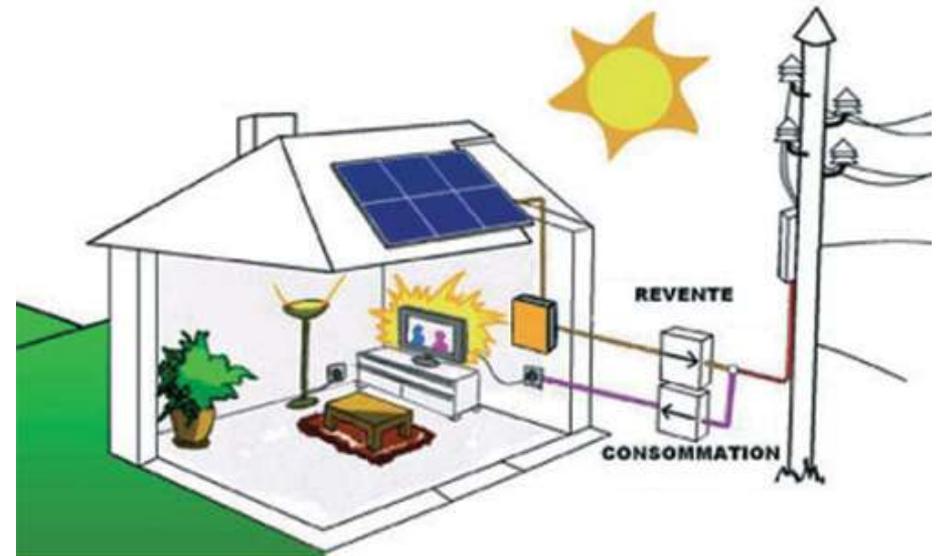
# Photovoltaïque

D'un rendement faible :  $\leq 16\%$  pour le meilleur silicium commercial

Les rendements du photovoltaïque « organique » sont faibles

Multicouches GaInP-AsGa-Ge  $> 30\%$  espéré

Boîtes quantiques  $\rightarrow 87\%$  théorique ? Mais en GaAs...



# Autres énergies renouvelables

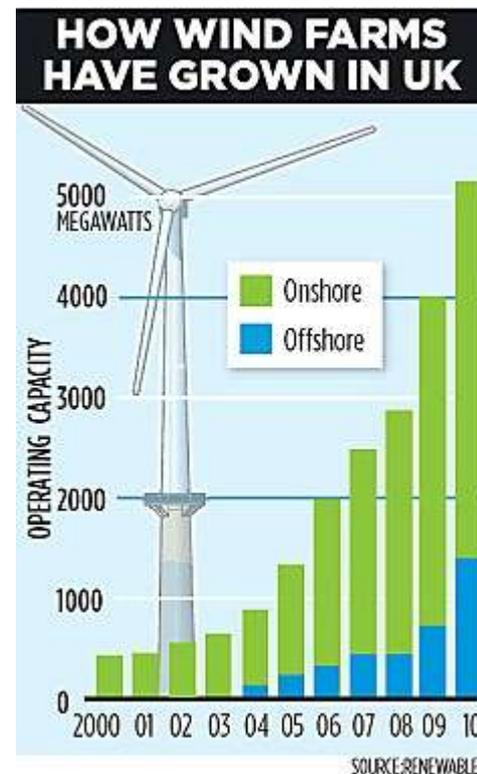
## ■ Eolien, y compris offshore

- A grande échelle, avec le solaire photovoltaïque l'éolien pose le problème du **stockage** de l'électricité produite par les énergies **intermittentes**
- Ils ne sont utilisés que pour la production d'électricité qui ne représente mondialement que 17 % de l'énergie primaire

## ■ Géothermie (surtout développée aux USA)

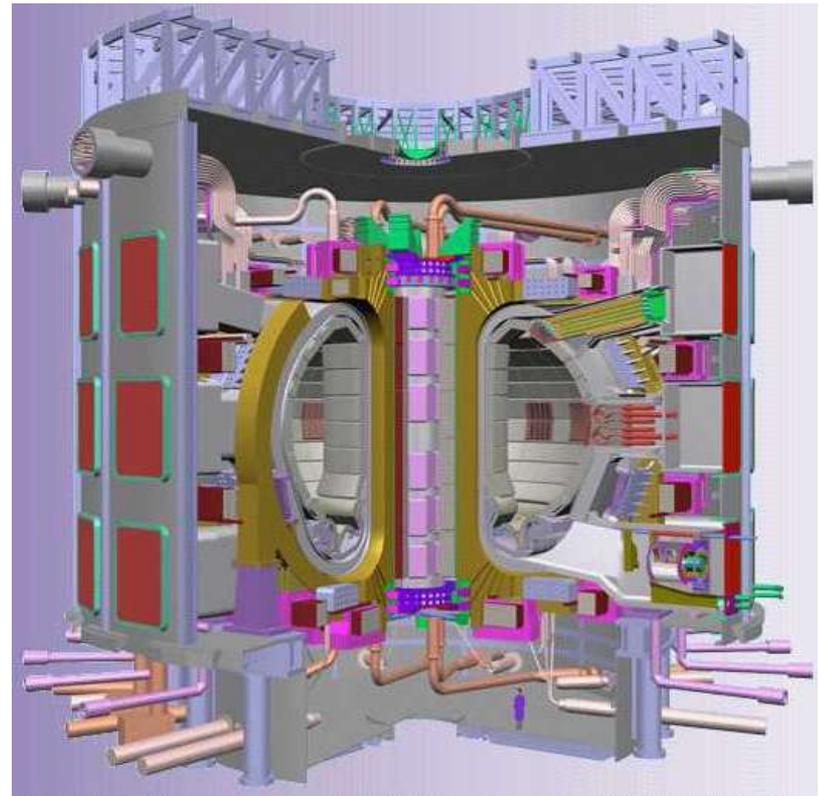
## ■ Biomasse et agrocarburants

-> au détriment des plantes nutritives  
alors que + 200 000 personnes par jour



## Energies du futur ?

- Solaire à concentration (CNRS THEMIS abandonné, relancé dans PEGASE)
- Nucléaire de quatrième génération
  - prolongerait de 5000 ans les réserves d'uranium
  - sécurité à renforcer
- Fission thermonucléaire contrôlée (ITER)

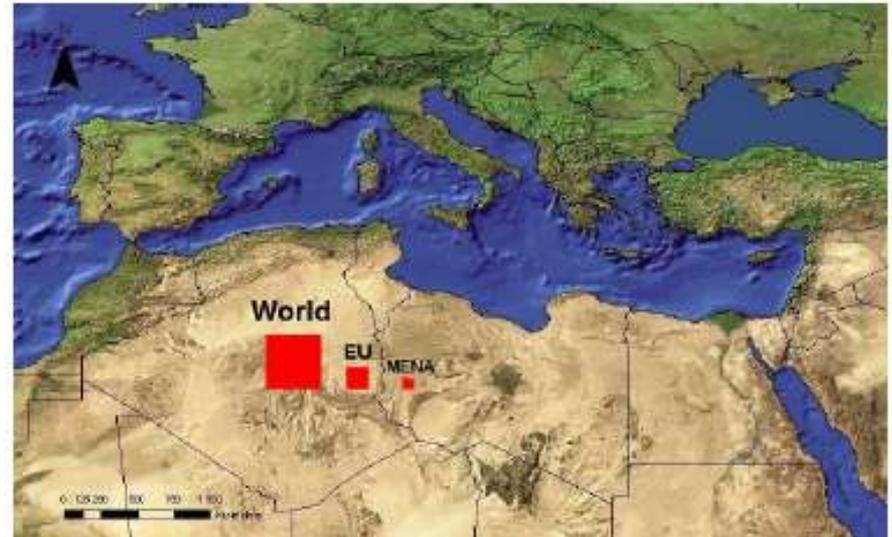


# Centrales solaires à concentration

## Projet Désertec et réalisation en Andalousie

Les déserts reçoivent par jour plus d'énergie solaire que l'Humanité en consomme en une année

Le bain de céramique en fusion au foyer de l'énergie solaire concentrée, reste chaud durant la nuit, permettant de produire l'électricité en continu sans avoir à la stocker

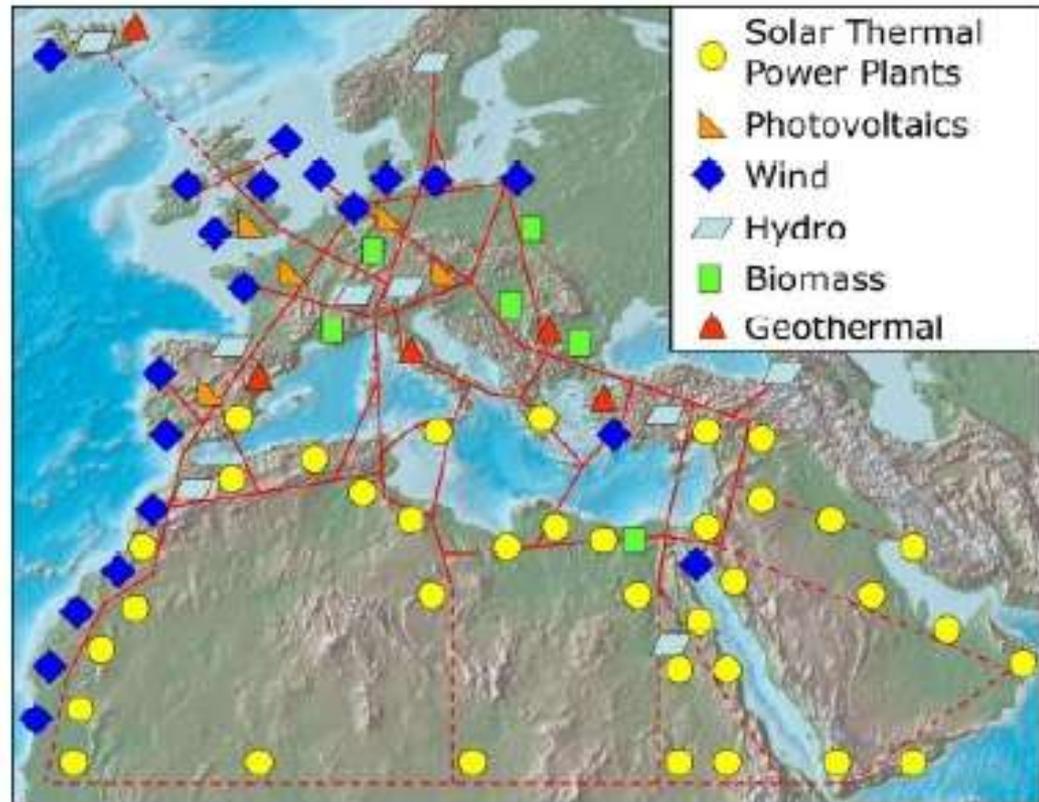


**À titre d'illustration:** Surface de centrales thermiques solaires qui permettrait de produire la quantité d'électricité actuellement consommée en MENA, en Europe (EU-25) et dans le monde entier.

## Désertec : un projet global de **mixte énergétique** qui ne résout toutefois pas le problème d'indépendance...

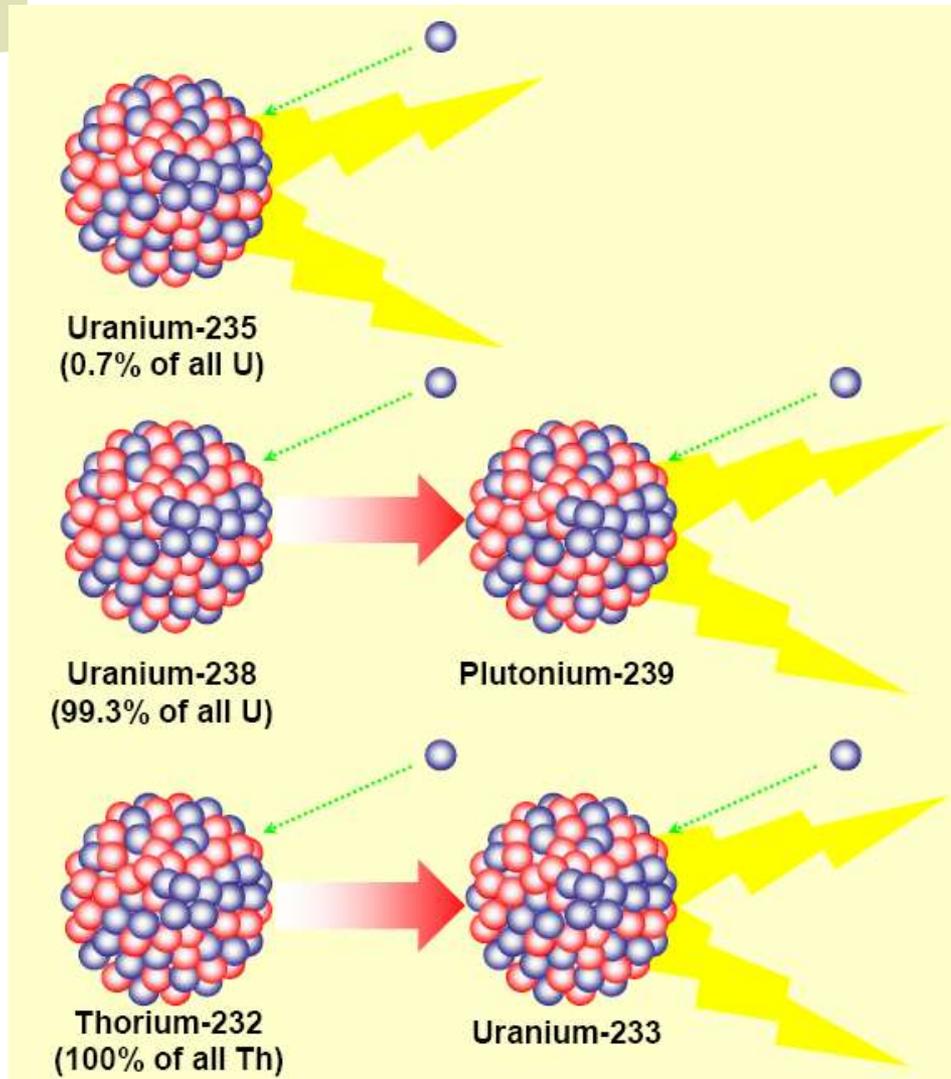
Distribution de l'énergie à < 3000 kilomètres :

- Lignes à haute tension ?
- Transformation en hydrogène ?
- Transport par câble supraconducteur ?

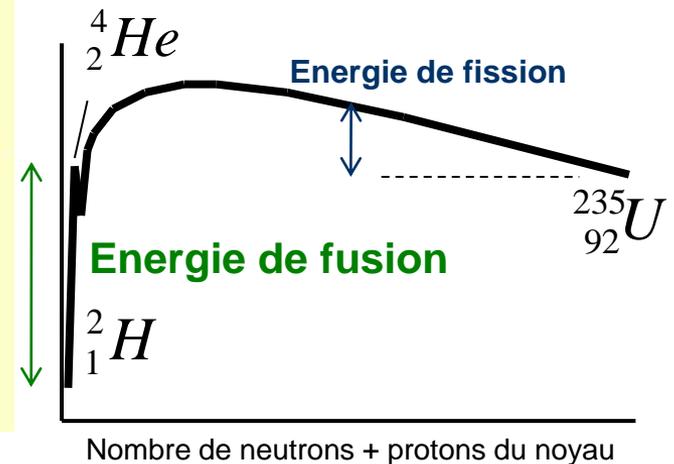


**Euro-Supergrid avec connexion EU-MENA :**  
**Schéma** d'une infrastructure possible pour un approvisionnement électrique durable en EU-MENA.

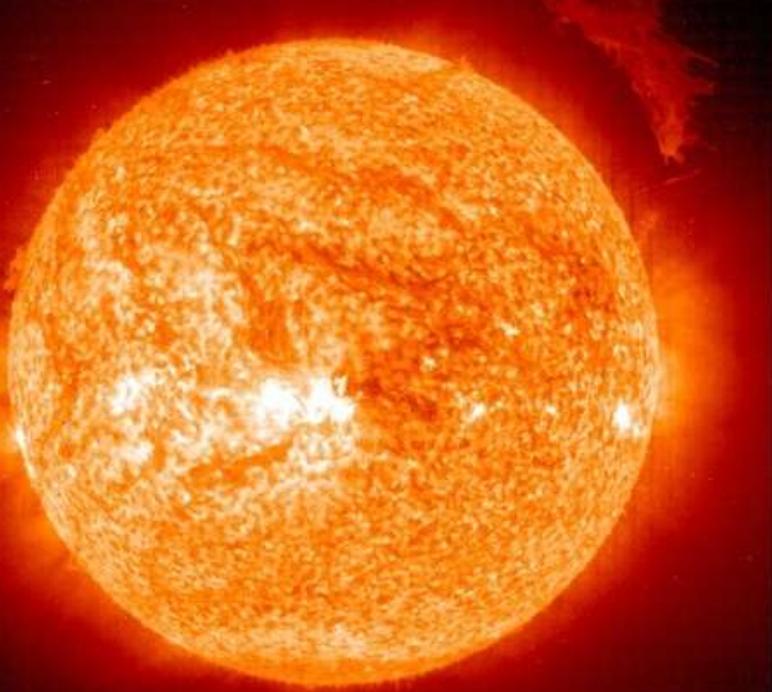
# Surrégénérateurs : électricité pendant ~ 5000 ans



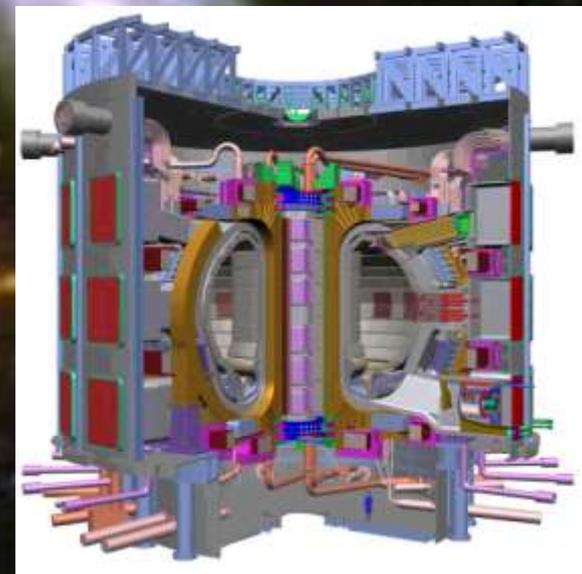
Les seuls déchets radioactifs actuels seraient suffisants pour assurer l'indépendance énergétique de la France



# Fusion thermonucléaire



Soleil ( $10^{26}$  watts,  $0.01 \text{ W/m}^3$ )



ITER ( $5 \cdot 10^8$  watts ;  $5 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$ )

### 3 remarques à propos du « carbone » émis sous forme CO<sub>2</sub> par la combustion des ressources fossiles

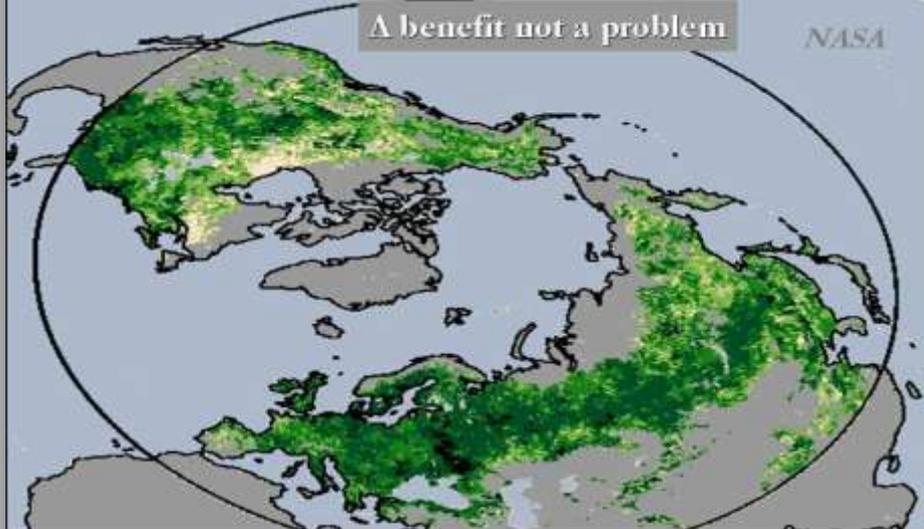
- 1 - Une usine pilote en Espagne le réutilise pour fabriquer un carburant au lieu de chercher à le stocker

L'énergie utilisée est celle du soleil, la matière première est le dioxyde de carbone produit par les cimenteries voisines, le procédé est à base de la photosynthèse d'algues



A benefit not a problem

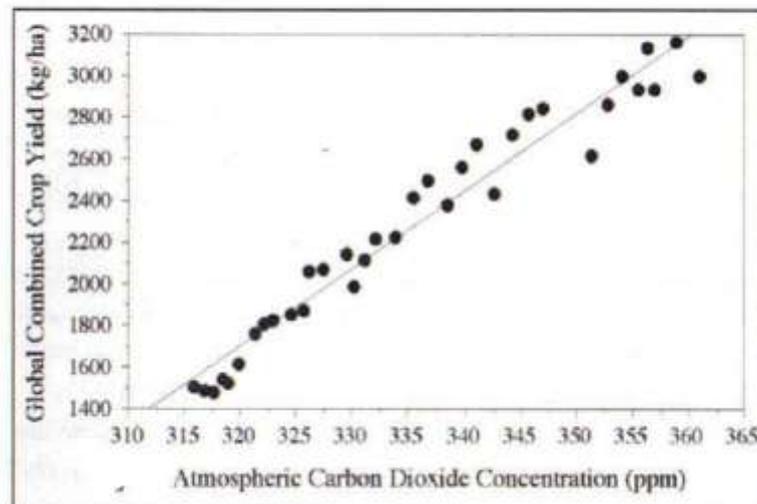
NASA



Crops increased threefold in the past 50 years from only 10% more land, while the world population has doubled

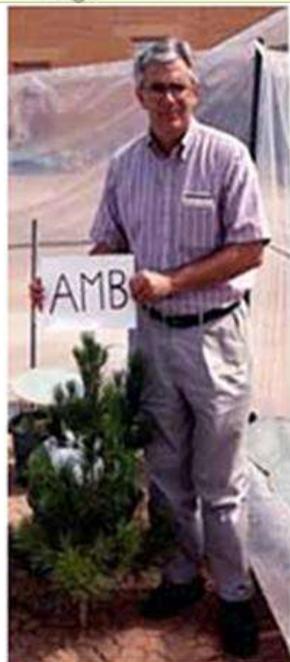


## CO2 and Crop Yields



UN Study Graph Blick 2009

**2 - Une concentration accrue en CO<sub>2</sub> (il y a 54 ans, inférieure de 20 % à aujourd'hui) bénéficie à la croissance des plantes et améliore le rendement des récoltes**



385 ppm



535 ppm



685 ppm



835 ppm

**8000 ppm dans un sous-marin**

■  
**CO<sub>2</sub> 0,039 %**

**Vapeur d'eau  
(100 %  
d'humidité)**

**Argon**

Oxygène

### **3 – Point sur les gaz à effet de serre**

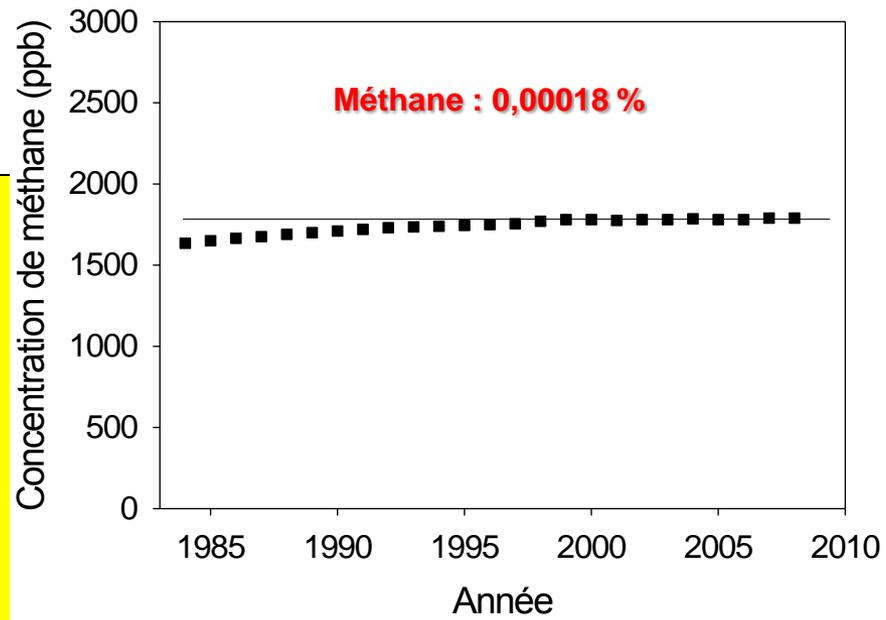
**La vapeur d'eau contribue à l'actuel effet de serre  
atmosphérique pour ~ 30°C  
le CO<sub>2</sub> pour ~ 3°C**

Azote

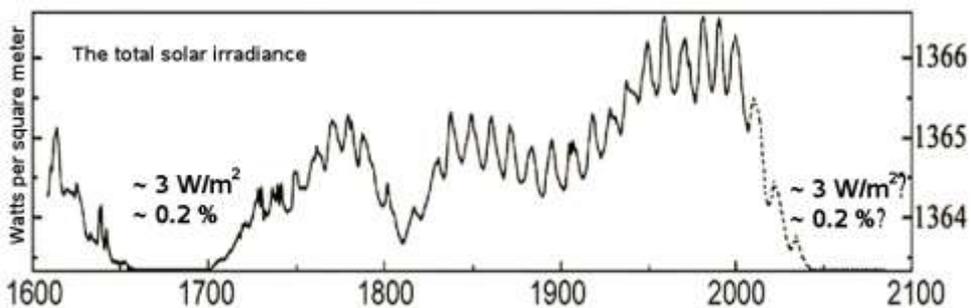
■  
**CO<sub>2</sub> 0,039 %**

**Vapeur d'eau  
(100 %  
d'humidité)**

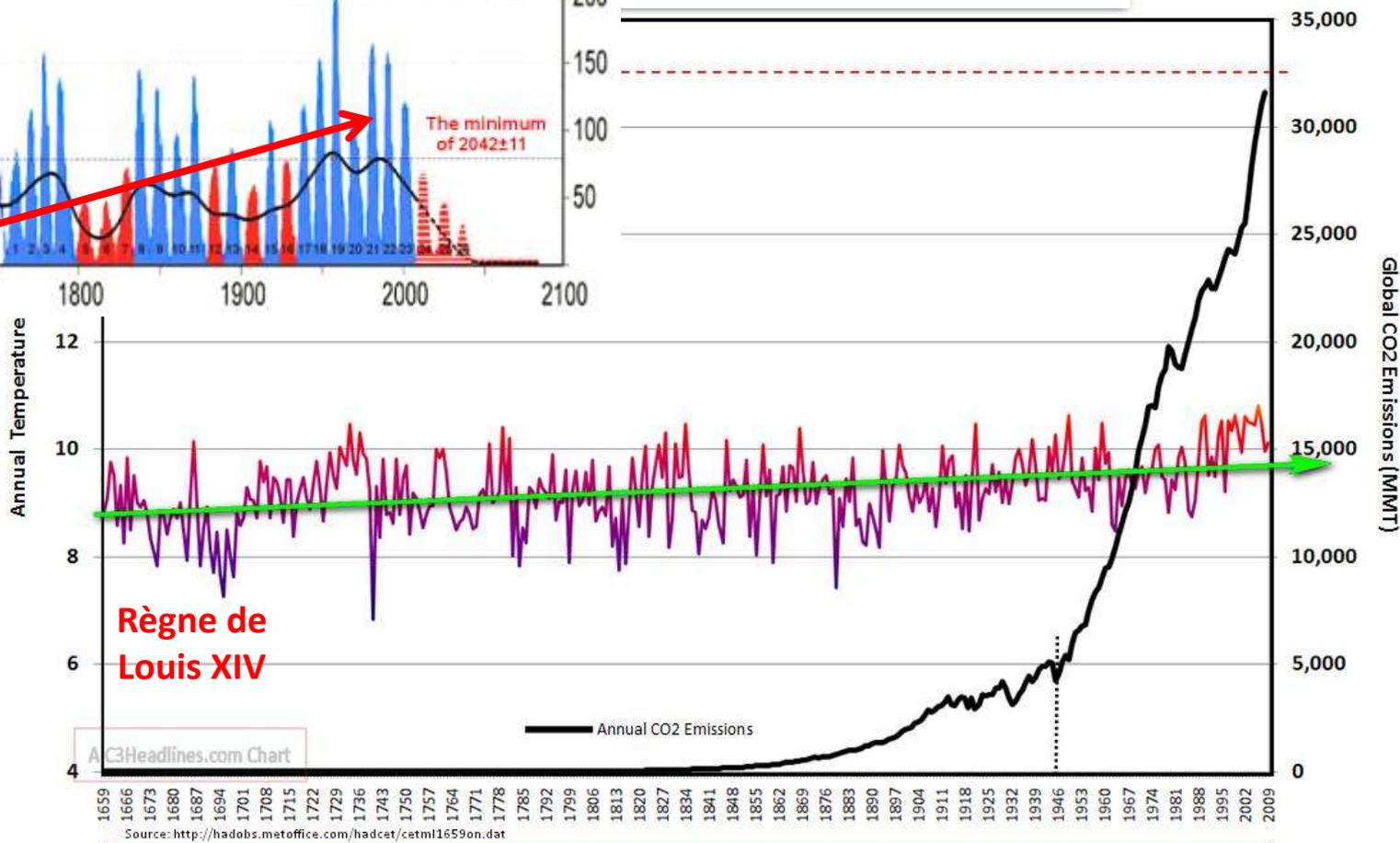
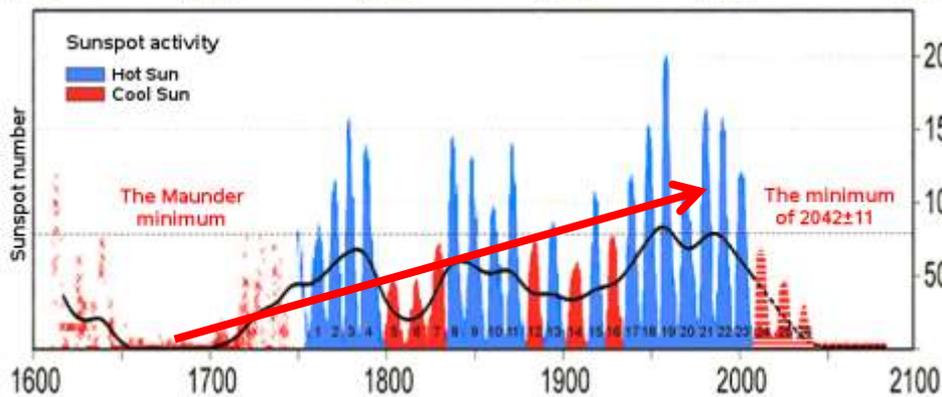
**Argon**

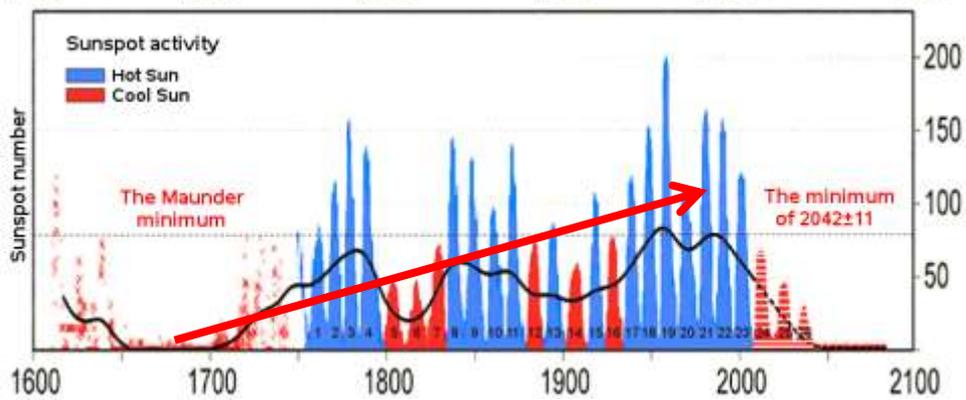
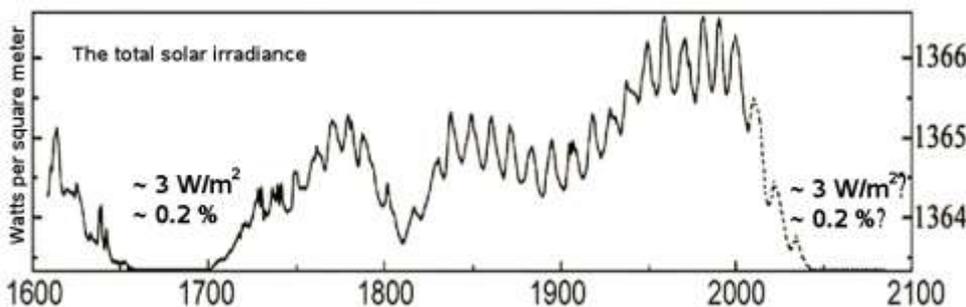


**Azote**

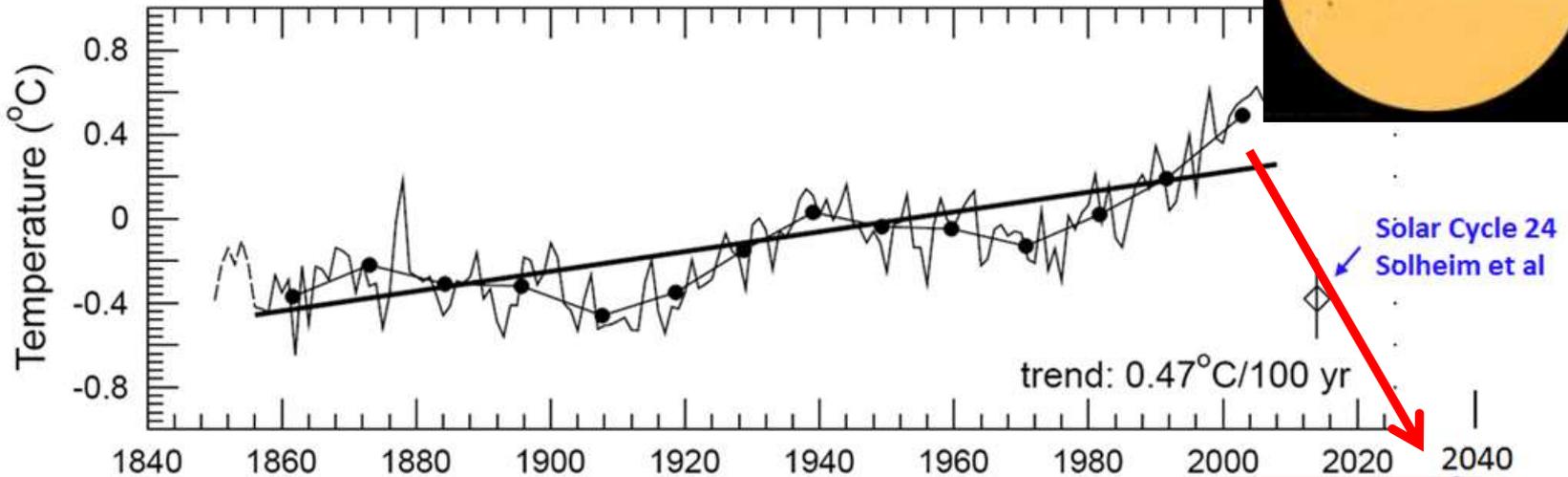
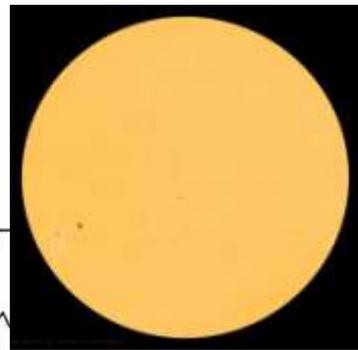


La Terre se réchauffe depuis la fin du dernier petit âge glaciaire (1695)

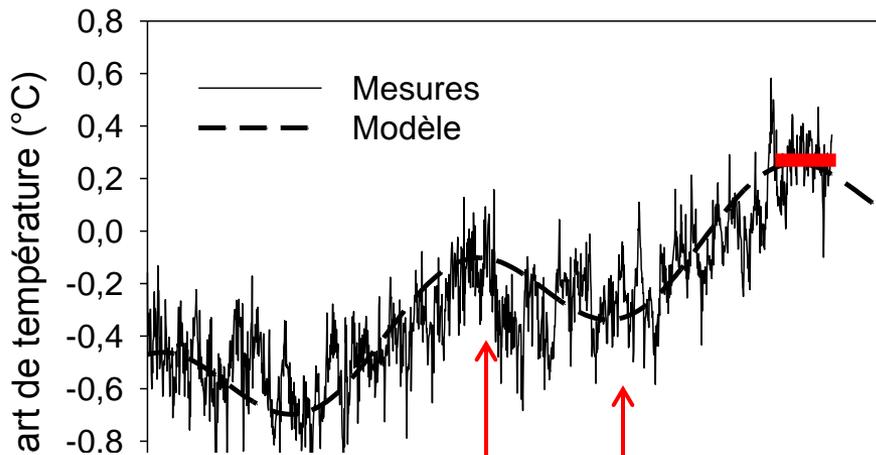




Augmentation de l'irradiance ici  
 « reconstruite » d'après l'observation  
 des taches solaires (merci Galilée)  
 conjuguée à la **diminution des nuages**  
 par déficit de rayons cosmiques déviés  
 par le champ magnétique des taches solaires  
 attestée par la chute en 150 ans du  
 « marqueur » <sup>10</sup>Be dans les glaces polaires



Elle pourrait se refroidir de plus d'un degré d'ici 2040

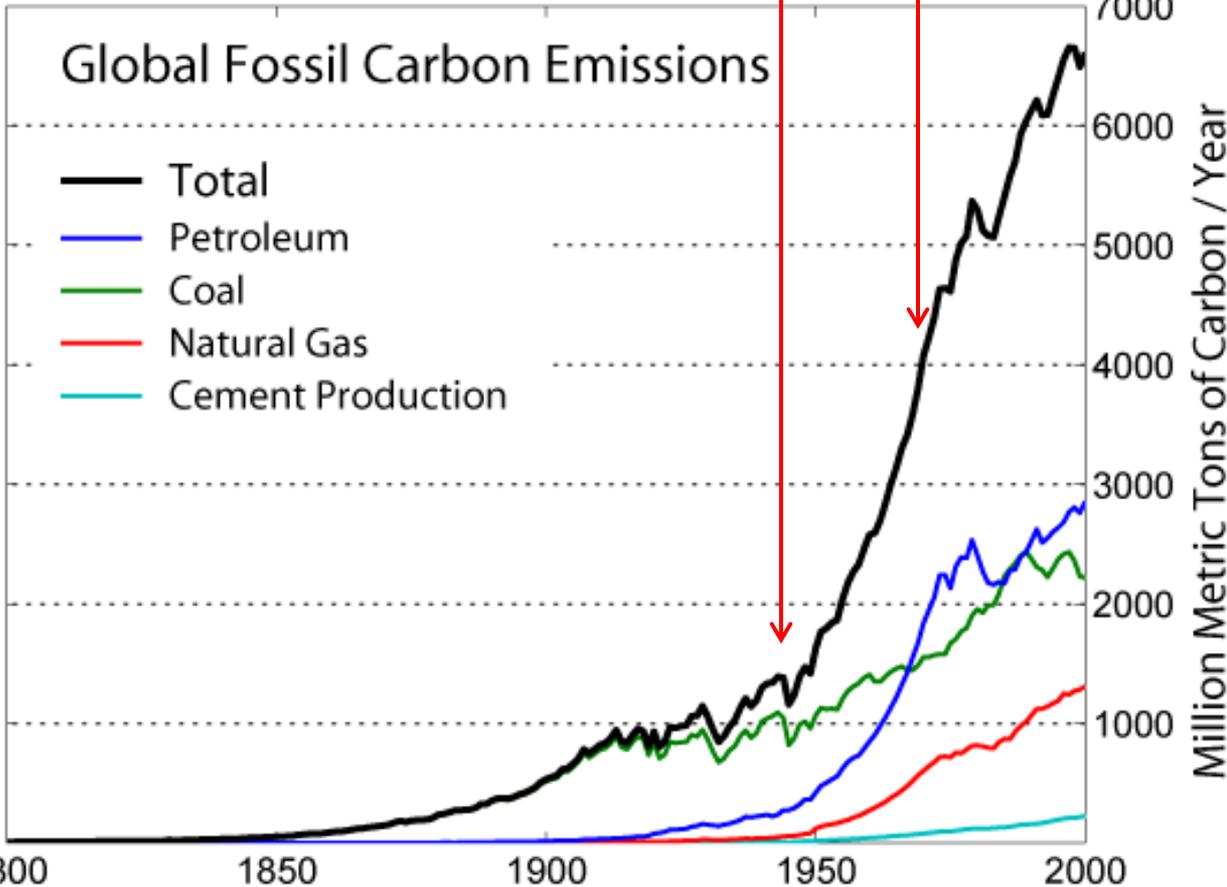


**Température moyenne des thermomètres HadCruT3**

**La dernière décennie a été la plus chaude depuis un siècle**

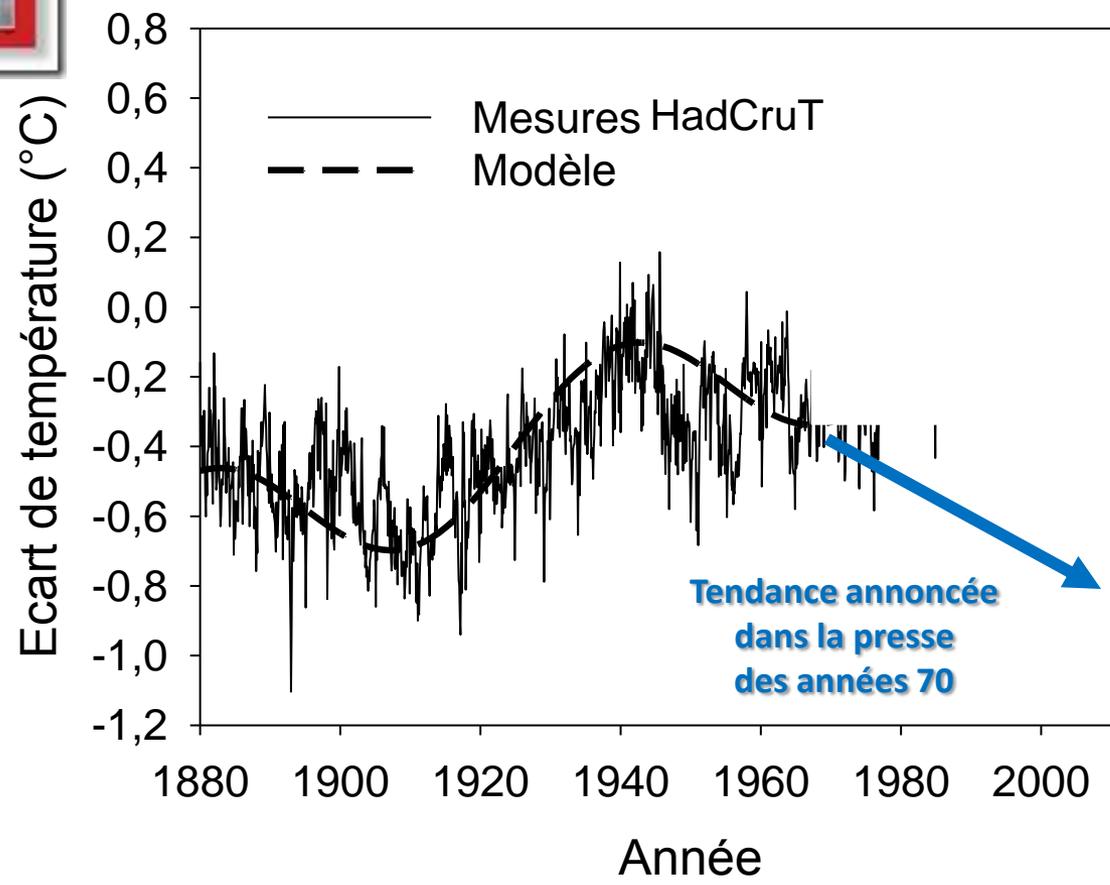
**Se superpose à une croissance lente une oscillation de période 60 ans**

**Le CO<sub>2</sub> ne semble pas le seul contributeur à la température**

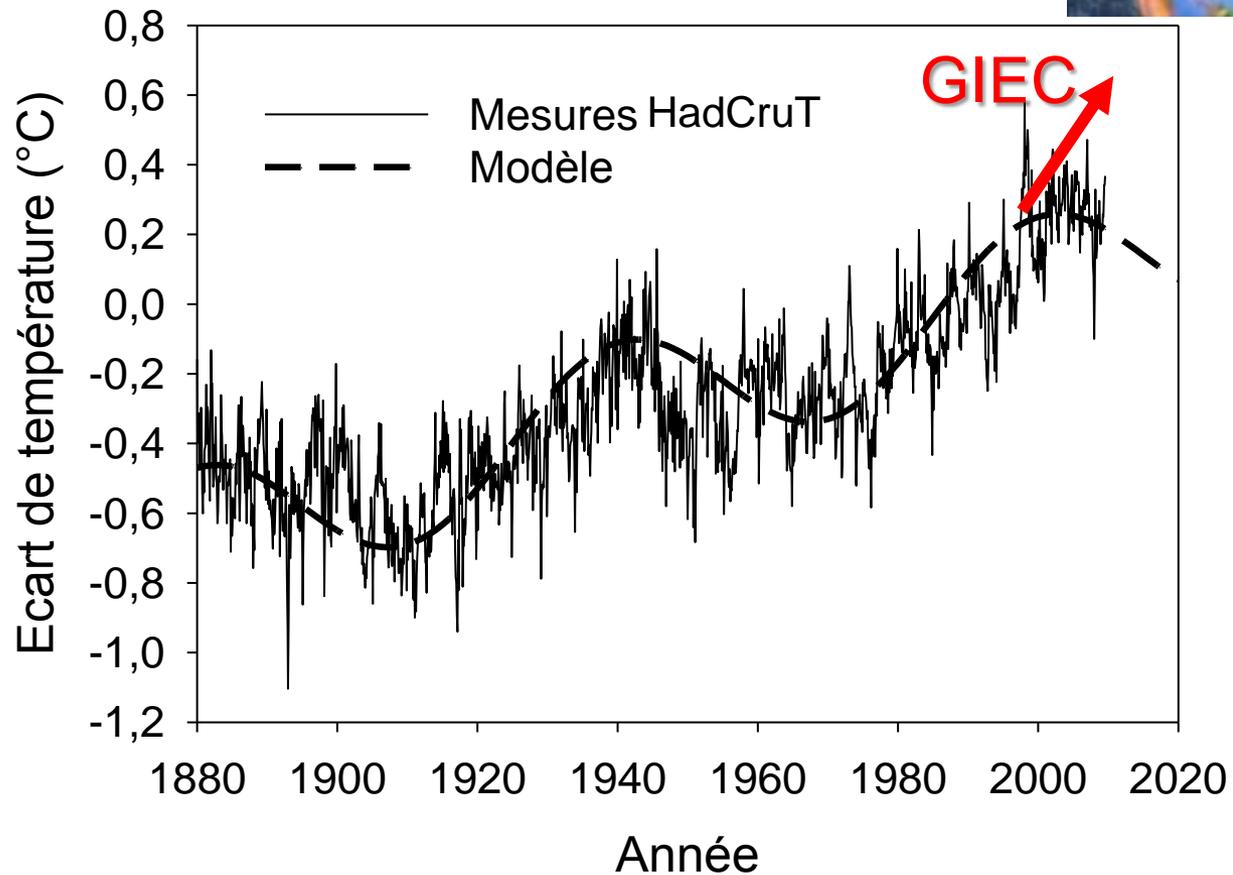




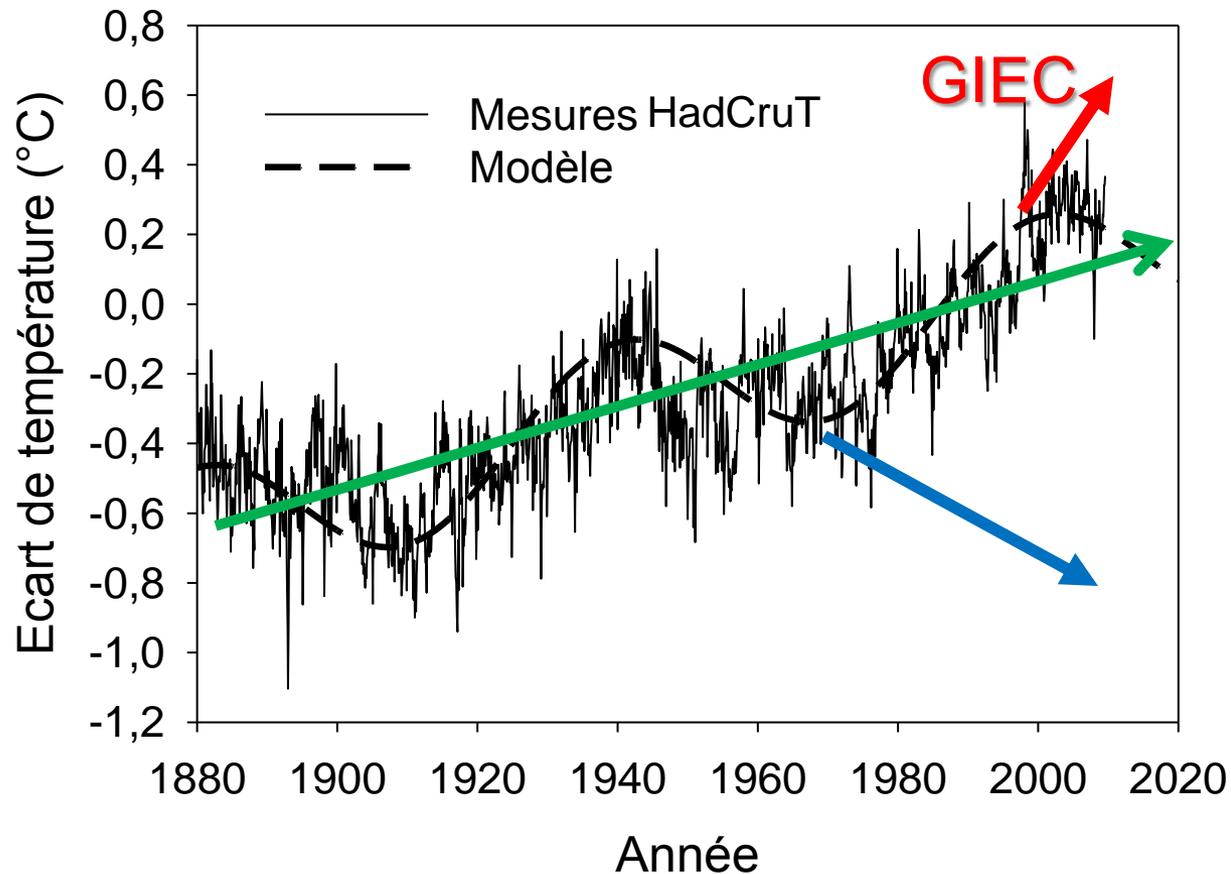
Dans les années 70, les experts annonçaient un refroidissement



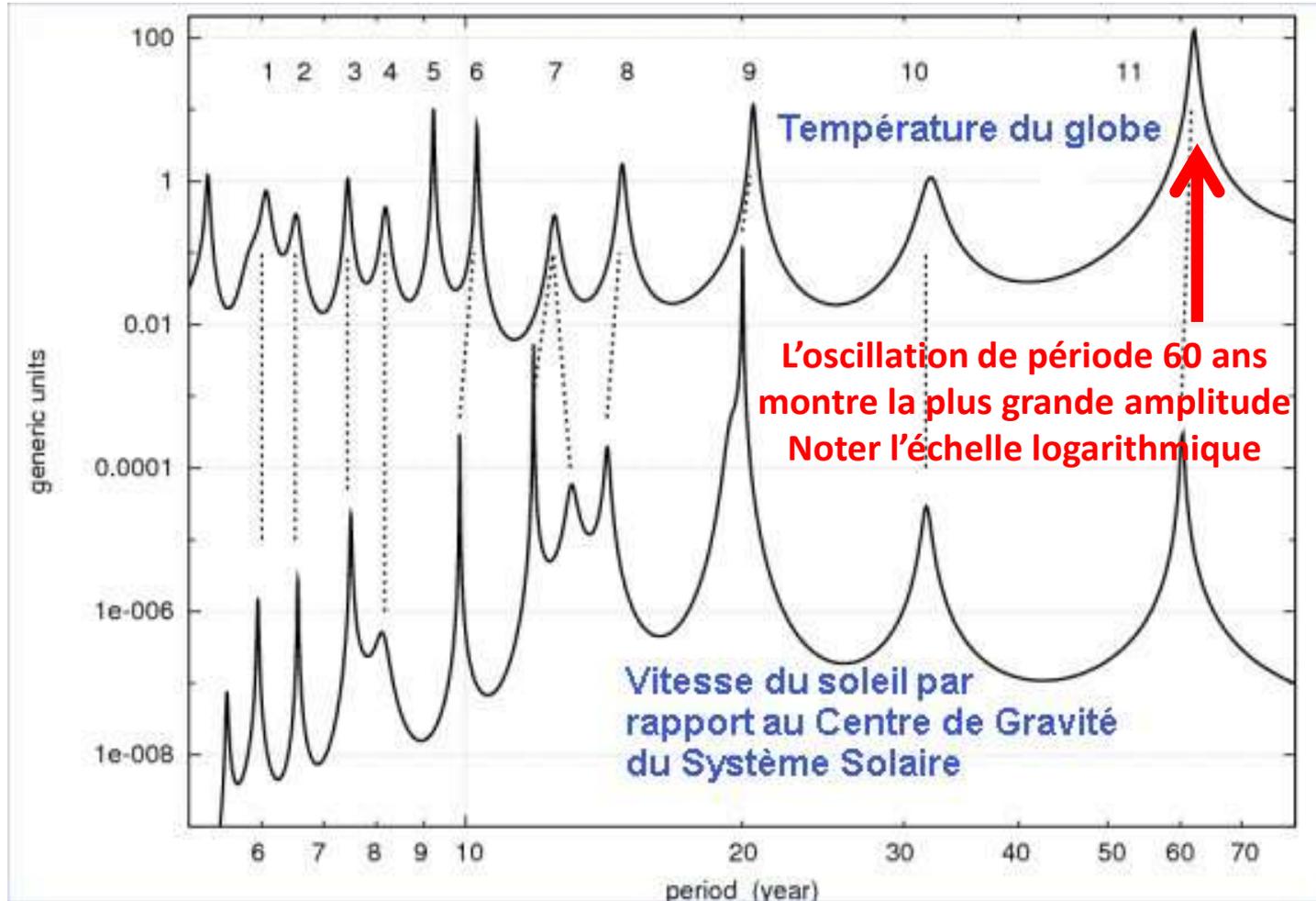
Certains de ces mêmes experts annoncent maintenant un réchauffement



**Caler les modèles sur la phase montante ou descendante d'une sinusoïde ne donne évidemment pas la même tendance que la droite moyenne, prolongement des observations depuis 1659...**



Une analyse de Fourier des températures terrestres montre qu'elles se corrèlent aux cycles des mouvements du Soleil par rapport au centre de gravité du système solaire  
La plus longue a la **période de 60 ans** retenue dans le modèle cyclique  
N. Scafetta - J. Atmospheric & Solar-Terrestrial Physics (2009)

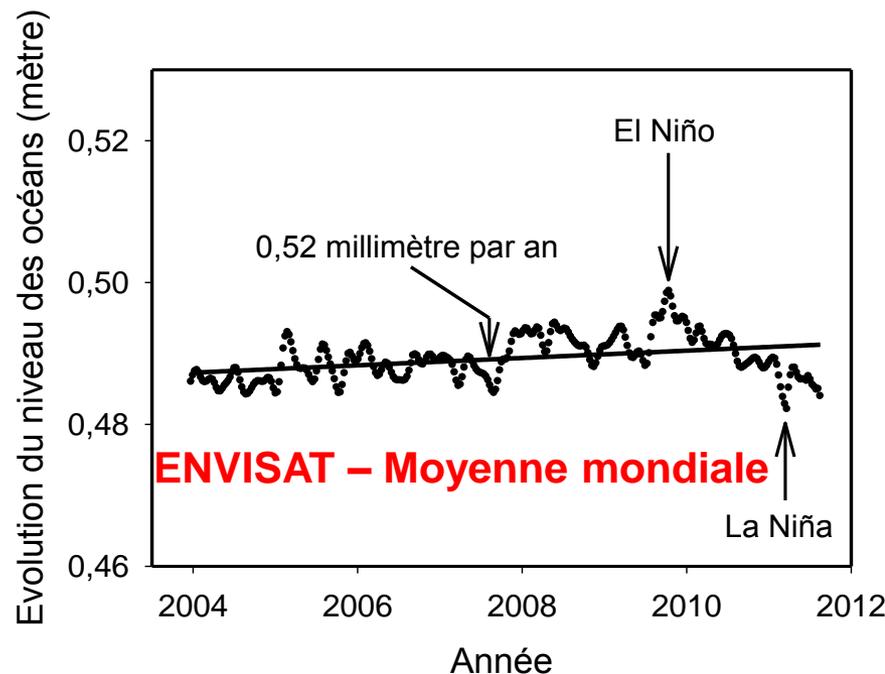
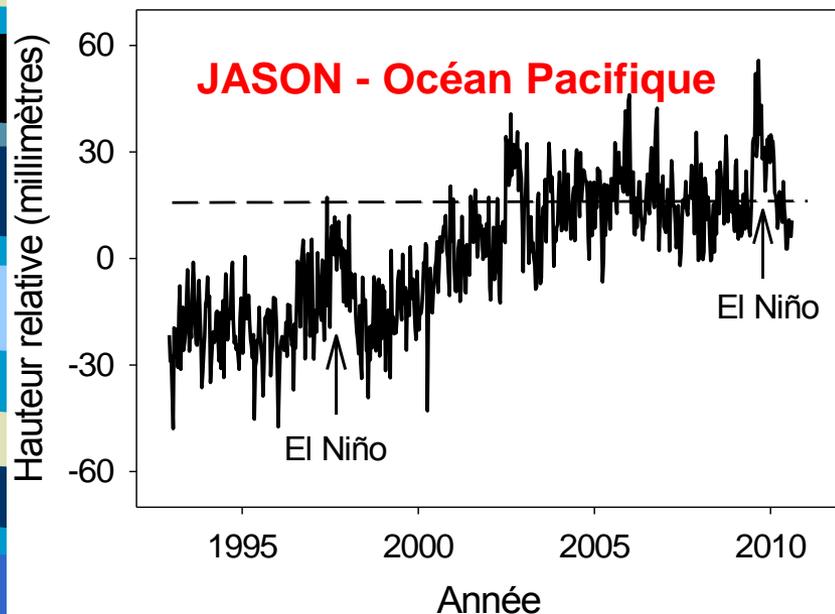


## Meilleur « thermomètre » : niveau des océans

### Les satellites JASON et ENVISAT ne montrent plus de hausse sensible depuis 10 ans (contrairement à la période antérieure pour JASON)

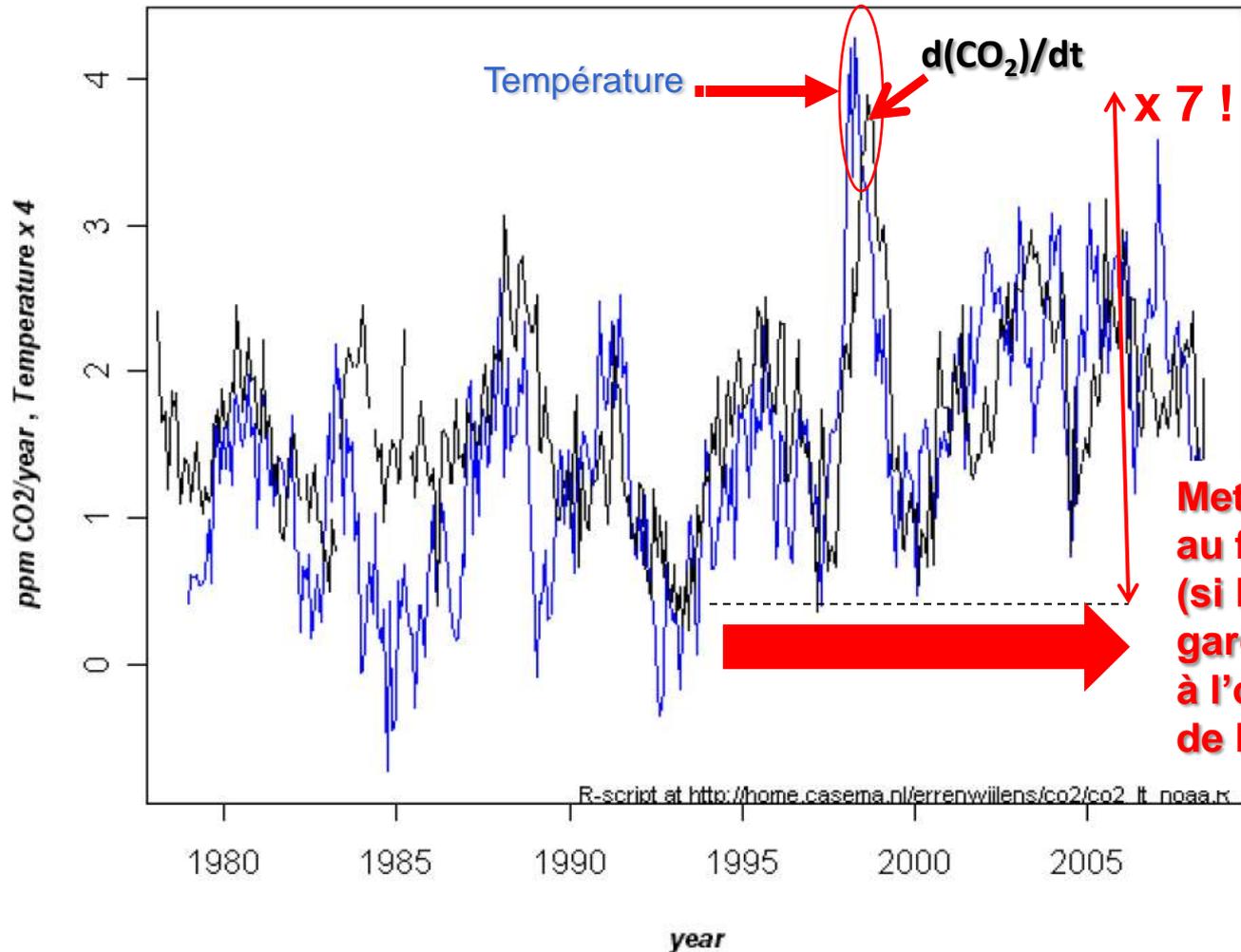
- Mesures altimétriques confirmées par la stagnation de la vitesse de rotation de la Terre  
 $10 \text{ cm}/6370 \text{ km} \sim 1,4 \text{ ms/jour}$

Mesures : 5-6 centimètres par siècle  
GIEC AR4 : 26-59 centimètres  
Al Gore : 5 mètres...

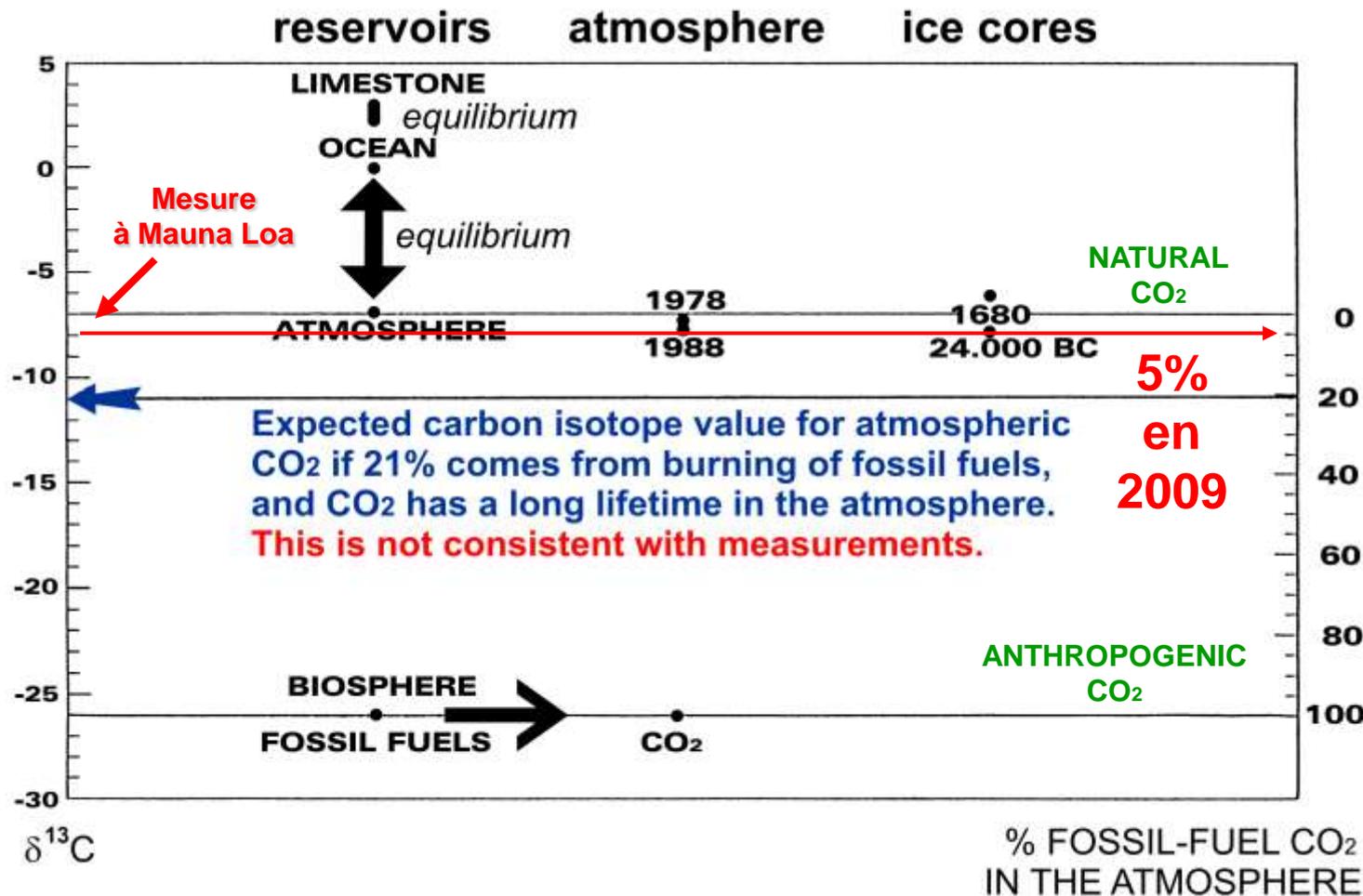


A l'instar de ce que montre l'analyse des carottes de Vostok, l'accroissement mensuel du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère *suit* la température de l'année précédente (décalage de 6 mois)

Comparison of annual CO<sub>2</sub> growth and lower troposphere temperature  
Black: Moving annual CO<sub>2</sub> growth (Mauna Loa),  
Blue: Lower troposphere temperature (MSU UAH)



**Mettre le Vouvray au frais  
(si l'on veut qu'il garde ses bulles à l'ouverture de la bouteille)**



### Quelle est la fraction de $\text{CO}_2$ anthropique dans l'air ?

A gauche : réservoirs caractéristiques des équilibres isotopiques entre carbone 12 et 13. Le  $\delta^{13}\text{C}$  mesuré à Mauna Loa montre que la fraction de  $\text{CO}_2$  anthropique n'excède pas **~ 5 %**, soit **~ 20 ppm**, à comparer à une augmentation de **22 %** depuis 50 ans

**augmentation : ~1/4 anthropique et ~ 3/4 naturel**



## Commentaires sur l'ébauche du rapport AR5 du GIEC (1779 pages...) parution prévue en 2014

- L'extrapolation en 2100 des **mesures** altimétriques suggère un réchauffement limité à  
 $0,7^{\circ}\text{C} \times 5,2/17 \sim 0,2^{\circ}\text{C}$  par siècle
- Les **modèles** commandés par le GIEC prévoient pour 2100 un réchauffement de 1° à 4°C
- ~ 1°C serait dû au CO<sub>2</sub>
- et jusqu'à 3°C supplémentaires pourraient être dus aux rétroactions de la vapeur d'eau

## Commentaires sur l'ébauche du rapport AR5 du GIEC (1779 pages...) parution prévue en 2014

- L'extrapolation en 2100 des **mesures** altimétriques suggère un réchauffement limité à  
 $0,7^{\circ}\text{C} \times 5,2/17 \sim 0,2^{\circ}\text{C}$  par siècle
- Les **modèles** commandés par le GIEC prévoient pour 2100 un réchauffement de  $1^{\circ}$  à  $4^{\circ}\text{C}$  ←
- $\sim 1^{\circ}\text{C}$  serait dû au  $\text{CO}_2$
- et jusqu'à  $3^{\circ}\text{C}$  supplémentaires pourraient être dus aux rétroactions de la vapeur d'eau

Les projections des rapports AR4 et AR5 sont entachées d'une incertitude avouée considérable : un facteur 4

Comparé au poids d'une personne, 35 kg ou 140 kg ?

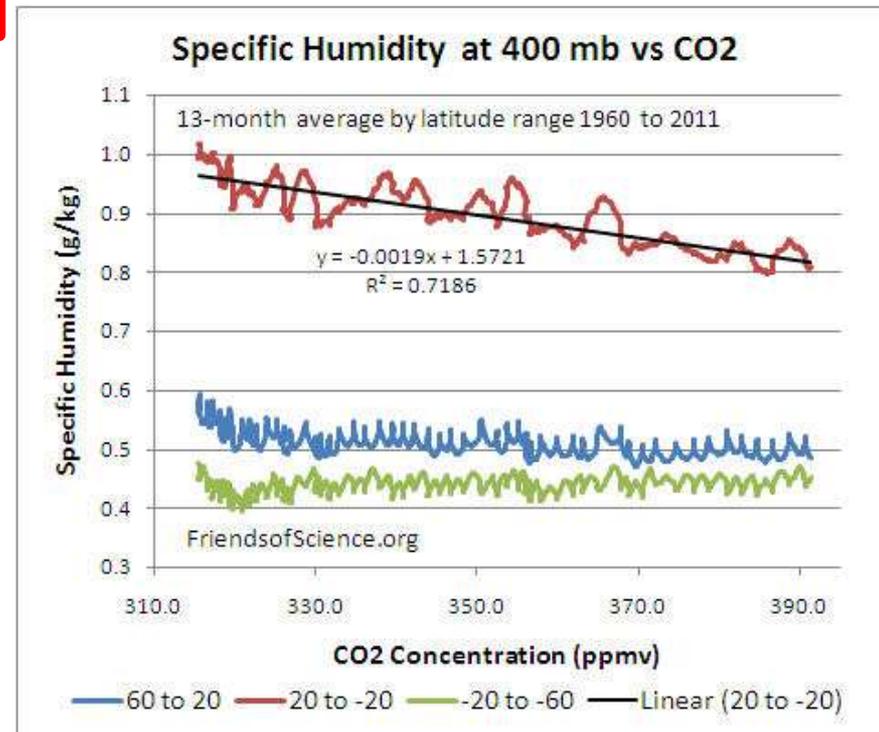
Doit-on soigner la Terre pour anorexie ou pour obésité ?

## Commentaires sur l'ébauche du rapport AR5 du GIEC (1779 pages...) parution prévue en 2014

- L'extrapolation en 2100 des **mesures** altimétriques suggère un réchauffement limité à  $0,7^{\circ}\text{C} \times 5,2/17 \sim 0,2^{\circ}\text{C}$  par siècle

- Les **modèles** commandés par le GIEC prévoient pour 2100 un réchauffement de  $1^{\circ}$  à  $4^{\circ}\text{C}$
- $\sim 1^{\circ}\text{C}$  serait dû au  $\text{CO}_2$
- et jusqu'à  $3^{\circ}\text{C}$  supplémentaires pourraient être dus aux rétroactions de la vapeur d'eau

- les **mesures** montrent au contraire que l'humidité spécifique décroît sous les tropiques là où les modèles prévoient les rétroactions maximales de la vapeur d'eau



## Commentaires sur l'ébauche du rapport AR5 du GIEC (1779 pages...) parution prévue en 2014

- L'extrapolation en 2100 des **mesures** altimétriques suggère un réchauffement limité à

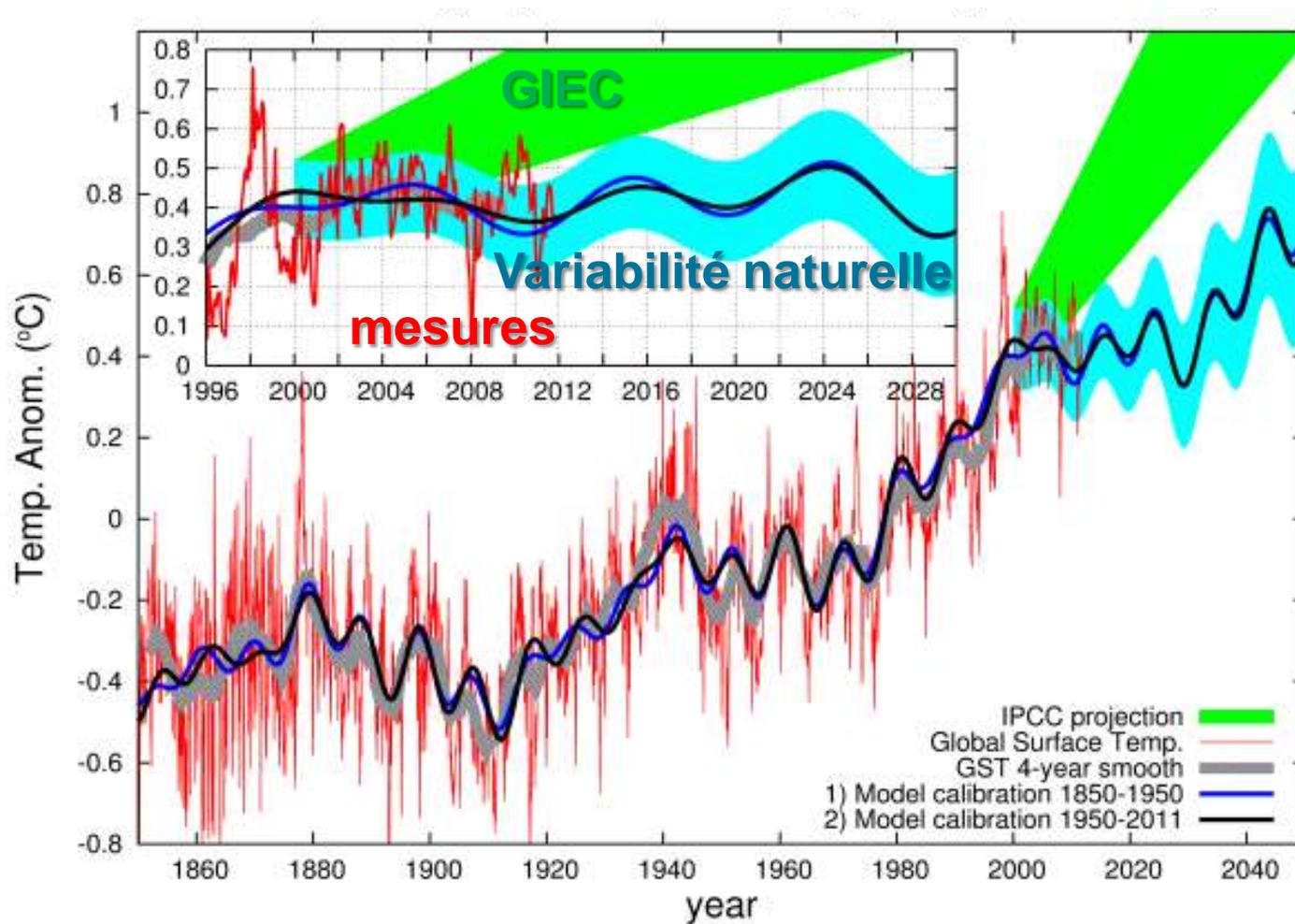
$0,7^{\circ}\text{C} \times 5,2/17 \sim 0,2^{\circ}\text{C}$  par siècle

- Les **modèles** commandés par le GIEC prévoient pour 2100 un réchauffement de  $1^{\circ}$  à  $4^{\circ}\text{C}$
- $\sim 1^{\circ}\text{C}$  serait dû au  $\text{CO}_2$
- et jusqu'à  $3^{\circ}\text{C}$  supplémentaires pourraient être dus aux rétroactions de la vapeur d'eau



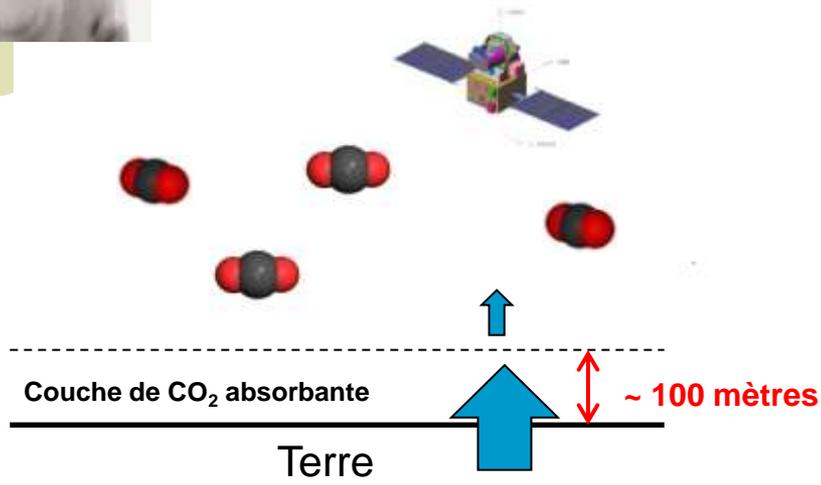
- Un accroissement des nuages pourrait au contraire augmenter l'albédo de la Terre et réduire son échauffement à  **$0,3^{\circ}\text{C}$**  en 2100...

On ne devrait pas tarder à être fixés...

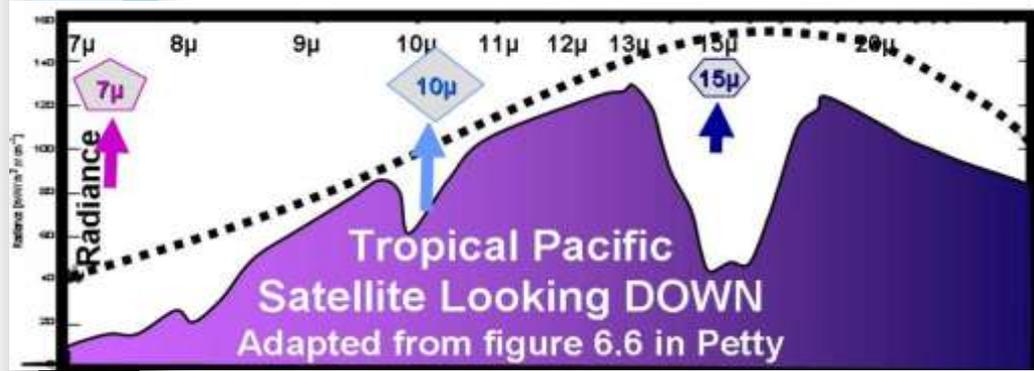
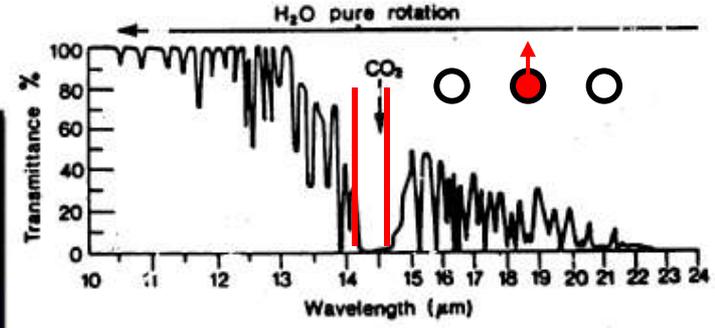
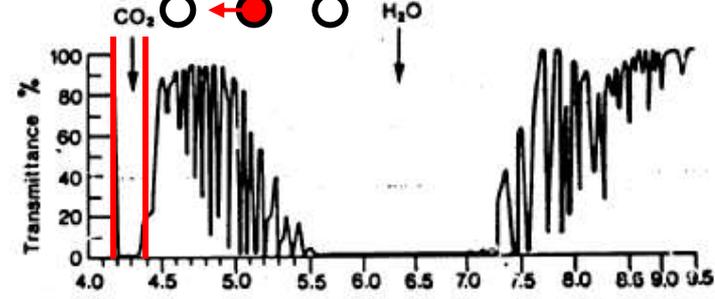
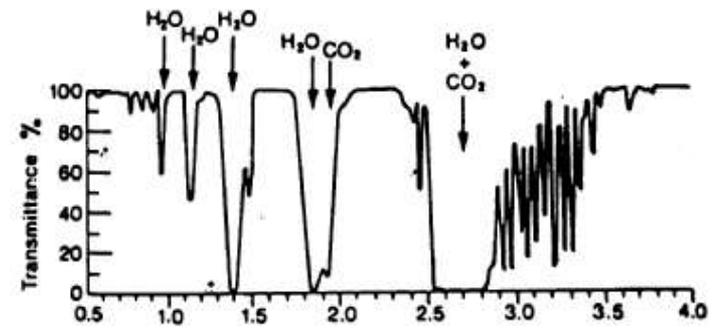




# L'effet de serre du CO<sub>2</sub> est déjà presque saturé



Les molécules de CO<sub>2</sub> en altitude « voient » très atténué le rayonnement infrarouge émis par la Terre, car il est occulté et très partiellement réémis, et ne peuvent donc contribuer à échauffer l'atmosphère



Farmer 1974



UNIVERSITÉ  
FRANÇOIS - RABELAIS  
TOURS



Le développement durable est un enjeu majeur du XXIème siècle, mais doit-il cautionner tout et n'importe quoi ? Pourquoi dépenser des milliers de milliards d'euros, **l'équivalent de la dette souveraine mondiale**, pour contrer un effet marginal ?

Se précipiter sur les énergies renouvelables *intermittentes* est-il la meilleure solution ? 1000 gigawatts électriques à stocker...

Développer la **recherche** pour accroître le potentiel des productions durables et *continues* :

- solaire à concentration
- nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération ?
- fusion thermonucléaire (ITER)
- autres

Efficacité énergétique

- lignes supraconductrices ?
- améliorer l'isolation thermique
- meilleurs rendements de conversion (S2E2)

-> Un financement « durable » de la recherche...

