

# CEB Policy Paper

**Centre Emile Bernheim**  
Research Institute in Management Sciences

 **Solvay Brussels School**  
Economics & Management

## **Bilan thermique de la terre et climat**

**André Fontana**

La population du globe s'accroît lentement à travers les âges pour atteindre de l'ordre de 1 milliard d'habitants au milieu du XIXe siècle. L'historique des périodes glaciaires fait apparaître à l'évidence des fluctuations du climat totalement indépendantes des activités humaines. Une approche du bilan thermique de la planète fait apparaître les causes possibles de ces énormes perturbations en tenant compte de l'acteur principal - le Soleil, des acteurs secondaires - les catastrophes et de l'acteur tertiaire - l'Homme.

Keywords: activité solaire, catastrophes naturelles, population du globe, énergies, bilan thermique

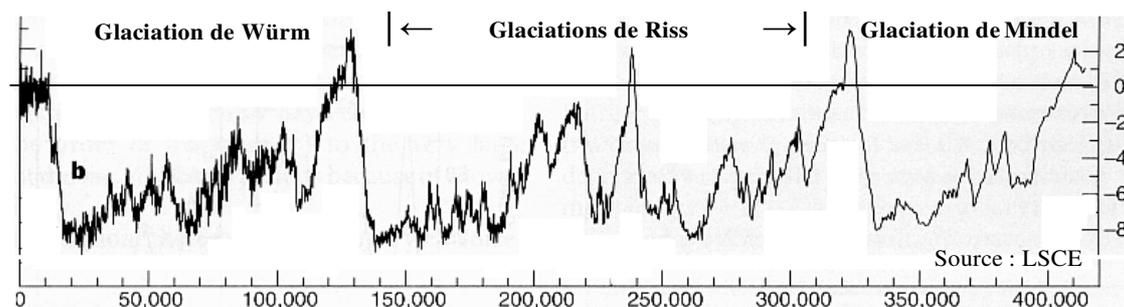
CEB Policy Paper N° 16/004  
June 2017

The opinions stated in this paper are the sole responsibility of the author

Previous version available on: <http://www.solvay.edu/latest-updates-ceb>



**Pendant les 400.000 dernières années**, le climat a subi des variations cycliques liés à des catastrophes naturelles et à la variation cyclique de certains paramètres astronomiques de la Terre, qui ont modifié la quantité de rayonnement que notre planète reçoit du soleil. Ces variations astronomiques ont produit 4 cycles à peu près identiques, d'un peu plus de 100.000 ans chacun, pendant lesquels il a fait assez froid pendant presque 100.000 ans (températures moyennes de la planète inférieure de 8° C) puis nettement plus chaud (températures moyennes de l'ordre de 17°C) pendant des périodes de 10 à 20.000 ans (Fig. 2).



**Fig. 2 : variations de la température moyenne de l'antarctique depuis 400.000 ans**

Depuis 400.000 ans, des éruptions de très fort indice d'explosivité (de 7 à 8) sont à l'origine des bouleversements climatiques.

Sur ces 400.000 dernières années, le maximum de la moyenne annuelle de la température est de 1 à 2°C au dessus de la moyenne actuelle (16 à 17 °C au lieu de 15).

- Nous sommes déjà dans une période chaude pour l'histoire "naturelle" de notre climat. En toute bonne logique, nous devrions approcher de la fin d'une période interglaciaire et le climat devrait avoir naturellement tendance à se refroidir.
- Une différence de quelques degrés de température moyenne n'est pas un changement mineur, loin s'en faut : avec 5 °C en moins, le niveau de la mer avait baissé de 100 mètres environ (on passait à pied sec de France en Angleterre) et l'Europe du Nord était recouverte d'un énorme glacier.

Chaque période de glaciation est suivie d'une période de réchauffement qui montre que la Terre retrouve un équilibre thermique avec des températures moyennes supérieures de plus de 2°C aux températures actuelles.

**Depuis 18.000 ans (éruptions du Sarno (Vésuve)**, les perturbations climatiques de plus faible amplitude sont courantes (fig.3). Le réchauffement holocène peut être lié à quelques éruptions volcaniques :

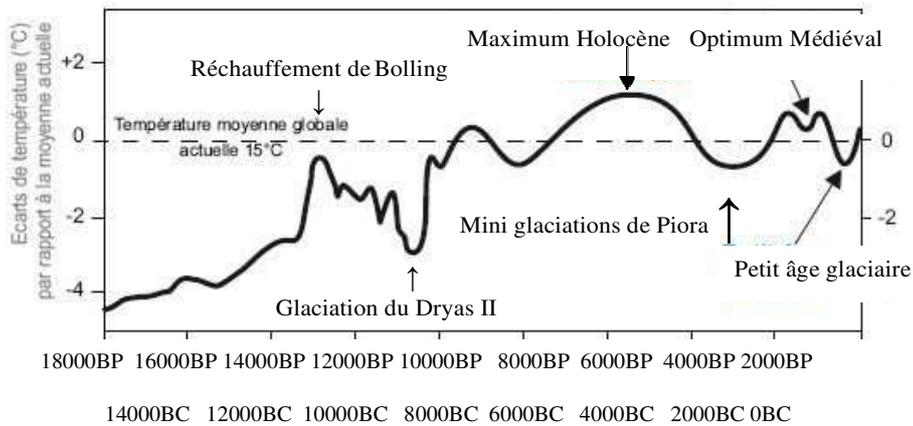
6440 BC: éruption du volcan Kurile Lake, Kamtchatka, 5677 BC: éruption du volcan

Crater Lake, Oregon, USA, 4350 BC: éruption du volcan Kikai, Japon

4000 BC : maximum Holocène → +1,5°C<sup>d</sup>

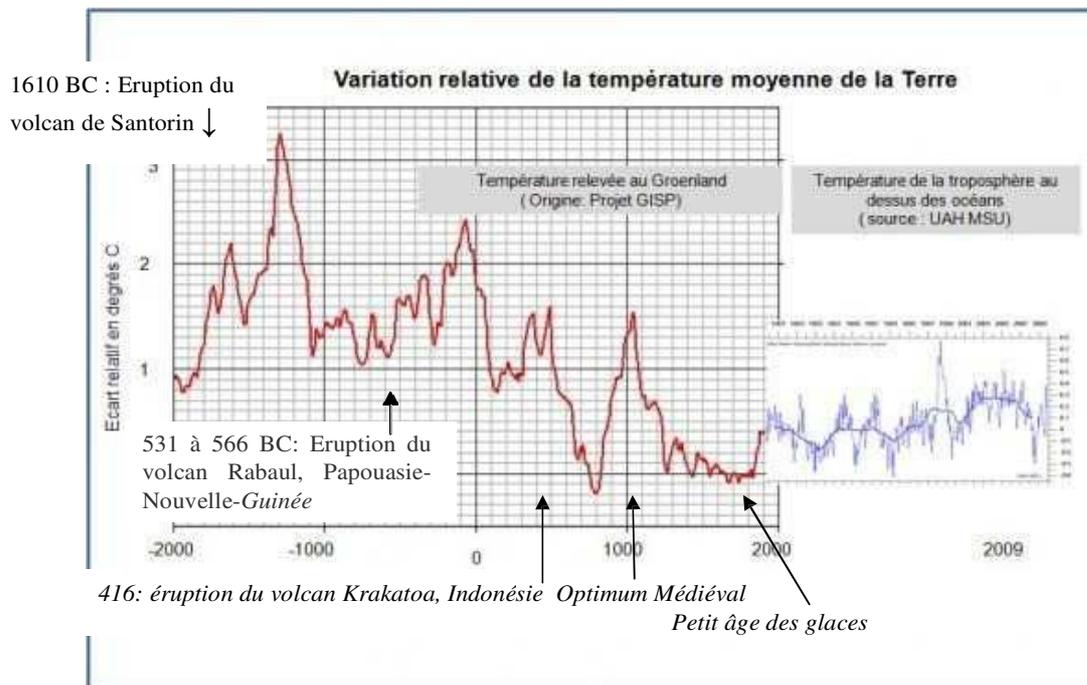
3550 BC et 3580 BC: éruption des volcans Pinatubo et Taal, Philippines, 2420 BC:

éruption du Vésuve (Italie)



**Fig. 3 : écarts de température par rapport à la moyenne actuelle**  
(Olivier Berruyer, [www.les-crises.fr](http://www.les-crises.fr))

Depuis 4.000 ans, on observe des variations cycliques de température au Groenland (fig.4)



**Fig. 4 : évolution des températures depuis 4000 ans**

Les éruptions volcaniques semblent précéder les périodes de refroidissement. Les éruptions du volcan Samalas, Indonésie (1257), du volcan du Mont Rinjani, Indonésie (1258), et du volcan Quilatoa, Andes (1280) causent le refroidissement qui suit l'optimum Médiéval.

Le petit âge des glaces de 1420 à 1830 pourrait être lié à plusieurs éruptions volcaniques : le volcan Kuwae, Vanuatu (1452), le Vésuve (1631), le volcan Laki, Islande (1783), le volcan Grimsvötn, Islande (1785), le volcan Unzen, Japon (1792), le volcan Tambora, Indonésie (1815), le volcan Cosigüina, Nicaragua (1835).

Enfin, de 1979 à nos jours, quatre éruptions volcaniques majeures ont pu avoir quelque influence sur le climat (fig.5):

en 1980, l'éruption du Mont Saint Helens, Washington (USA)

en 1985, l'éruption du volcan Nevado del Ruiz, Colombie

en 1989, éruption de l'Etna

en 1991, l'éruption du volcan Pinatubo, Philippines

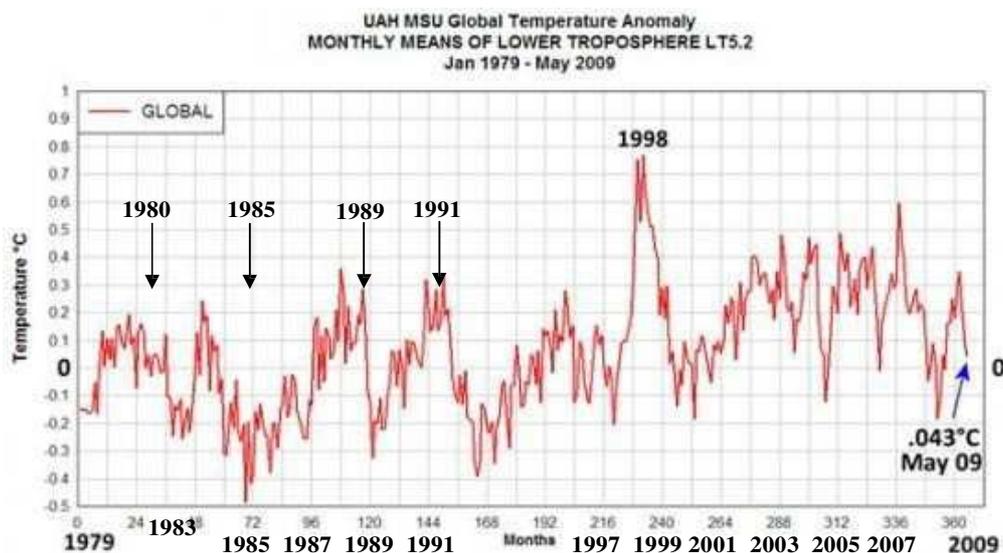


Fig. 5 : écarts de température par rapport à la moyenne actuelle

On observe que de tous temps, en dehors des périodes influencées par des catastrophes naturelles, le climat est influencé par d'autres facteurs et a toujours tendance à retrouver un certain équilibre thermique et des températures proches de celles qui peuvent être observées aujourd'hui. Il est indéniable qu'il existe des cycles de refroidissement et réchauffements indépendants des catastrophes naturelles.

Après avoir résumé brièvement l'historique des glaciations et interglaciations nous abordons le bilan thermique de la planète afin de mettre en évidence la capacité de la Terre à retrouver son équilibre thermique.

Ensuite, pour approcher les dérèglements climatiques trois acteurs sont envisagés : les Catastrophes, le Soleil et l'Homme.

## 2.- La Terre – bilan thermique

Le rayonnement solaire est composé d'un ensemble d'ondes électromagnétiques. L'atmosphère filtre les rayons de longueur d'ondes très courtes, ce qui provoque une absorption de chaleur (les rayons x, gamma). Traversent l'atmosphère les rayons ultraviolets (UV, de 200 nm à 400 nm), la lumière visible (400 à 800 nm), et les rayons infrarouges (IR de 800 à 1400 nm).

La puissance totale du rayonnement solaire entrant dans le système sol-atmosphère-océan est estimée à 173 pétawatts ( $173 \cdot 10^9$  MW).

Ce rayonnement est intercepté par la surface externe terrestre dont le disque apparent a une superficie de  $1,27 \times 10^{14}$  mètres carrés<sup>2</sup>.

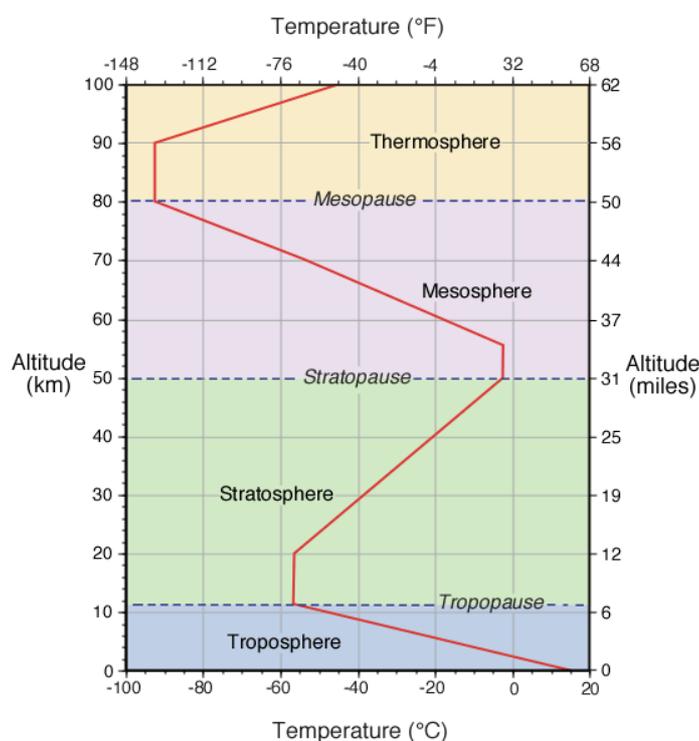
<sup>2</sup> Pour un rayon estimé de 6.371 km

La **constante solaire** exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de  $1 \text{ m}^2$  située à une distance de 1 ua (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, *en l'absence d'atmosphère*<sup>3</sup>. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère :  $F = 1\,360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ .

Comme ce flux est intercepté par l'ensemble de la surface de la terre ( $4\pi R^2$ ) qui est quatre fois plus grande que le disque équatorial ( $\pi R^2$ ), le rayonnement solaire incident moyen correspond à la constante solaire divisée par quatre, soit environ  $342 \text{ W/m}^2$ .

En une année, la quantité totale d'énergie disponible à « la limite » de l'atmosphère est donc de  $1.500.000 \cdot 10^9 \text{ MWh}$  ( $15 \cdot 10^8 \text{ TWh}$ ).

Une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère et contribue à son réchauffement (fig 6).



**Fig. 6 : températures des différentes couches de l'atmosphère**

Les rayonnements ultraviolets et X sont principalement absorbés au-dessus de 100 km en altitude, tandis que les rayonnements visible et infrarouge atteignent en partie la surface terrestre, une partie est réfléchi par l'atmosphère et les nuages (fig. 7).

La Terre bénéficie également des forces de gravitation et de l'énergie géothermique<sup>4</sup> (négligeables en comparaison avec l'apport d'énergie solaire).

On examine tout d'abord le bilan thermique global de la planète, puis les échanges sol-troposphère seront analysés en vue de définir l'effet de serre.

<sup>3</sup> C-à-d à la « limite » de l'atmosphère

<sup>4</sup> Géothermie : la puissance issue de l'activité radioactive à l'intérieur de la Terre représentant à peu près 0,025 % de la puissance totale reçue

### Le cycle global terre - espace

Lorsque la terre est à température constante, l'énergie reçue doit être égale à l'énergie réémise sous forme de rayonnement infra rouge (fig.7) :

A.-  $342 \text{ W/m}^2$  reçus par le soleil sous la forme d'un rayonnement électromagnétique à haute énergie<sup>1</sup> et réparti comme suit :

1.  $103 \text{ W/m}^2$  réfléchi par l'atmosphère et la Terre (albedo)
  - a.  $21 \text{ W/m}^2$  réfléchis à la « limite » de l'atmosphère
  - b.  $68 \text{ W/m}^2$  réfléchis par la stratosphère et les nuages
  - c.  $14 \text{ W/m}^2$  réfléchis directement par la surface exposée du globe
2.  $65 \text{ W/m}^2$  absorbés par l'atmosphère et les nuages<sup>5</sup>
  - a.  $55 \text{ W/m}^2$  absorbés par l'atmosphère
  - b.  $10 \text{ W/m}^2$  absorbés par les nuages
3.  $174 \text{ W/m}^2$  absorbés par la surface terrestre  
( $0,079 \text{ W/m}^2$  absorbés par les réactions de photosynthèse chlorophyllienne)

B.-  $239 \text{ W/m}^2$  réémis par la terre sous forme d'un rayonnement infrarouge :

1.  $219 \text{ W/m}^2$  réémis par les nuages et l'atmosphère vers l'espace
2.  $20 \text{ W/m}^2$  réémis directement par la Terre

Le bilan global est donc nul :  $342 \text{ W/m}^2$  reçus par le soleil et  $103 \text{ W/m}^2$  en réflexion directe (albedo) +  $239 \text{ W/m}^2$  réémis dans le spectre infrarouge.

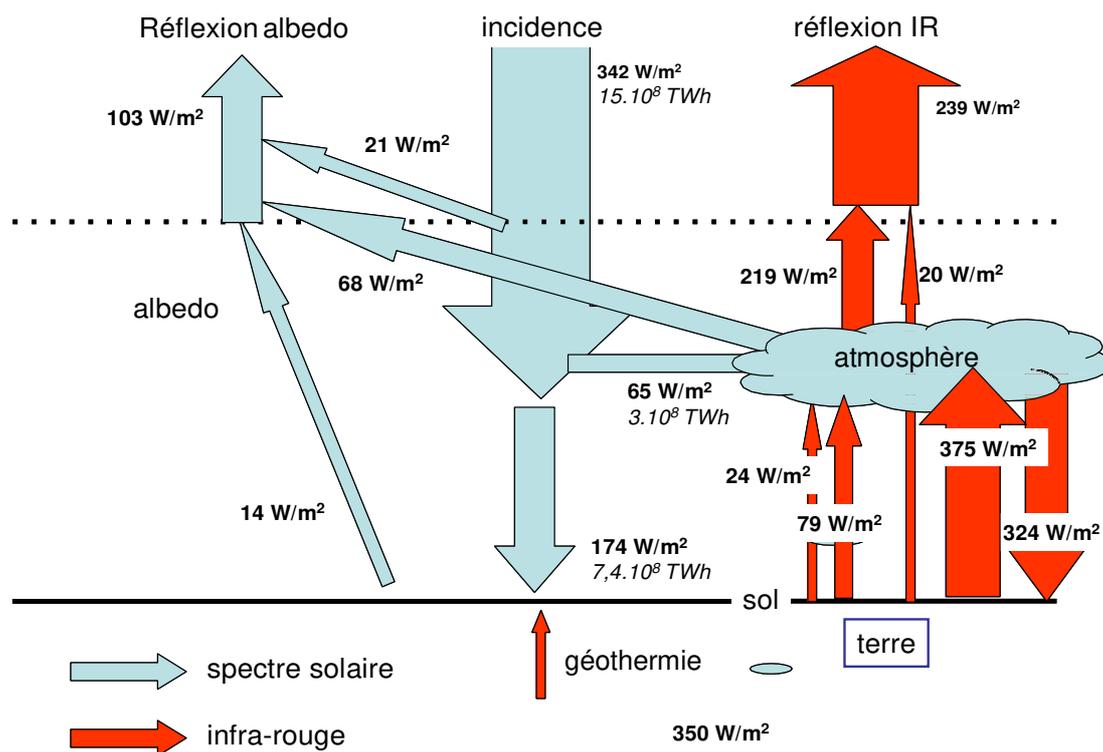


Fig. 7 : Bilan thermique annuel de la terre avant la moitié du XIXe Siècle

<sup>5</sup>  $65 \text{ W/m}^2$  sont absorbés dans l'atmosphère par les molécules d'air, dont  $10 \text{ W/m}^2$  par les nuages. Les ultraviolets sont absorbés en grande partie par l'ozone, et les infrarouges par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone et le méthane. La lumière visible est absorbée en partie par les nuages mais elle atteint majoritairement la surface de la Terre.

### ***Le cycle troposphérique - effet de serre.***

Il existe des échanges d'énergie entre le sol et la troposphère :

**C.- Le sol reçoit 498 W/m<sup>2</sup> :**

- 1. 324 W/m<sup>2</sup> en rayonnement Infrarouge de la troposphère**
- 2. 174 W/m<sup>2</sup> en rayonnement solaire**

**D.- Le sol émet 498 W/m<sup>2</sup> :**

- 1. 375 W/m<sup>2</sup> en rayonnement vers la troposphère**
- 2. 79 W/m<sup>2</sup> apporté aux nuages et à la troposphère par chaleur latente dans la vapeur d'eau**
- 3. 24 W/m<sup>2</sup> dans des phénomènes de diffusion et convection,**
- 4. 20 W/m<sup>2</sup> en rayonnement direct vers l'espace**

Un corps froid comme la Terre émet principalement des ondes radio, millimétriques et infrarouges. La surface de la Terre, qui n'est pas très chaude, 15°C en moyenne, réémet une partie de l'énergie solaire sous forme infrarouge qui peut être absorbée par l'atmosphère et les nuages (fig.7).

L'énergie émise par rayonnement infrarouge dépend directement de la température de la planète. La surface terrestre émet 395 W/m<sup>2</sup> (D1 + D4) par rayonnement infrarouge. Cette quantité permet d'attribuer à la Terre une température moyenne théorique en assimilant la Terre à un corps noir<sup>6</sup>. Pour  $M = 395 \text{ W/m}^2$ , la formule donne une température de +15 C. Cette valeur correspond à une température théorique radiative de la Terre.

Le rayonnement infrarouge émis vers l'espace est de 239 W/m<sup>2</sup> (B) et correspond une température théorique de -19 C.

La différence entre la puissance émise par la surface terrestre et la puissance émise vers l'espace, à savoir 156 W/m<sup>2</sup>, correspond à l'effet de serre.

Cet effet de serre réchauffe donc la surface terrestre d'environ 34 °C, dont 2/3 sont attribués à la vapeur d'eau dans l'atmosphère, et 1/3 au CO<sub>2</sub>.

C'est donc grâce à l'effet de serre que la température moyenne à la surface du globe est de l'ordre de +15°C, au lieu de -19°C en absence d'effet de serre. On comprend donc très bien la raison pour laquelle la terre tend toujours à retrouver un équilibre thermique après une catastrophe naturelle.

Depuis 500.000 années, la température de surface a connu des extrêmes (+7°C et + 18°C) (fig.2). Au minimum de température, la perte par rayonnement de la planète n'est plus que de l'ordre de 349 W/m<sup>2</sup>. L'énergie reçue par le soleil est donc supérieur aux déperditions de la Terre et elle se réchauffe tout naturellement: c'est la période interglaciaire. Pendant la période interglaciaire qui suit le minimum de 7°C, le rayonnement infrarouge de la terre augmenté de 16,7% et la planète retrouve son équilibre thermique aux alentours des 15 à 18°C. En effet, lorsque la terre s'échauffe, les pertes par rayonnement augmentent et le bilan thermique devient négatif : l'énergie reçue par le soleil devient inférieure aux déperditions terrestres. Le bilan thermique stabilise ainsi la température terrestre.

Depuis 18.000 ans, la température moyenne de la surface du globe a varié entre 11°C et 16°C (fig.3).

La figure 5 montre bien qu'il existe des variations cycliques du climat.

L'Homme étant hors de cause pendant ces périodes, il faut s'intéresser aux deux acteurs principaux : les catastrophes naturelles et le Soleil.

---

<sup>6</sup> La loi de Stefan-Boltzmann permet en effet de déterminer la température T d'un corps noir à partir de la quantité de rayonnement qu'il émet :  $M = \sigma T^4$  ( $M = 395 \text{ W/m}^2$  (D1 + D4),  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann

### 3.- Les catastrophes naturelles.

Les éruptions volcaniques donnent lieu à des écoulements de lave, mais aussi des émissions de poussières qui peuvent atteindre la stratosphère, des gaz volcaniques dissous (à haute température et haute pression) qui sont riches en vapeur d'eau, en dioxyde de carbone, en dioxyde de soufre, et en moindre quantité, en monoxyde de carbone, en chlorure d'hydrogène, en sulfure d'hydrogène, et en l'hydrogène. Ces émissions de poussières et de gaz limitent le transfert de chaleur vers la surface du sol. C'est donc le terme de  $174 \text{ W/m}^2$  qui doit être revu à la baisse (A3)<sup>7</sup>. De plus, si la terre se recouvre de glaciers et de surfaces enneigées, le terme de  $14 \text{ W/m}^2$  doit être revu à la hausse (A1c). Il en résulte donc une forte diminution de l'énergie nette reçue à la surface du globe. La température baisse de 10 à 11°C pour atteindre de minimas de 7°C (inférieurs de 8°C par rapport à la situation actuelle) (fig.2).

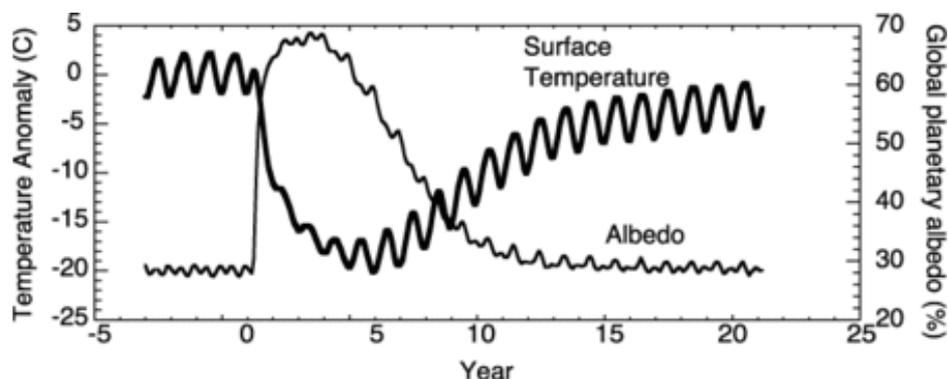
Il en résulte des « hivers volcaniques » de plusieurs années, décrits dans de nombreux textes chinois, égyptiens, romains,<sup>8</sup>...et une période de glaciation s'amorce.

A la longue, les éléments perturbateurs disparaissent et le bilan thermique se rétablit, la période interglaciaire s'installe, la terre retrouve des températures de l'ordre de +2°C à +3°C par rapport à la situation actuelle (fig.2).

Les périodes de glaciations intenses ont effectivement été précédées de catastrophes naturelles. En voici quelques-unes.

C'est probablement l'éruption du volcan de Toba (Sumatra) il y a 73.000 ans<sup>9</sup> qui aurait provoqué la dernière glaciation de Würm. Cette éruption aurait provoqué un hiver volcanique de 6 à 10 ans.

Les matériaux expulsés, ignimbrites et cendres, sont estimés à  $2.800 \text{ km}^3$ . Si on suppose un temps d'éruption entre 9 et 14 jours, le rythme des émissions devait approcher 8 millions de tonnes par seconde (Rose W.I. 1990). Selon les simulations, la quantité de dioxyde de soufre relâchée dans la stratosphère a laissé pendant de nombreuses années réservoir de  $\text{SO}_2$ . Les températures ont baissé de 12°C en été, favorisant la croissance de la couche de glace et augmentant l'albedo, réfléchissant encore plus la lumière solaire et par effet « boule de neige » réduisant d'autant la température (fig.8).



*Fig. 8: Une simulation numérique montrant l'impact possible de l'éruption de Toba sur la température de surface de la Terre. Une brusque montée de l'albédo de la planète provoque un refroidissement rapide et important en quelques années seulement. Crédit : Nasa*

<sup>7</sup> Voir bilan global et figure 7

<sup>8</sup> Plutarque, *Vie de César* : « Il y eut aussi l'obscurcissement de la lumière du soleil : toute cette année-là, en effet, son disque resta pâle ; il n'avait aucun rayonnement à son lever et ne produisait qu'une chaleur faible et languissante, l'air demeurait ténébreux et lourd parce que la chaleur qui le traversait était trop faible, et les fruits à demi-mûrs, se gâtaient et pourrissaient avant d'être parvenus à terme, à cause de la fraîcheur de l'atmosphère. »

<sup>9</sup> +/- 4.000

Plus proche de nous, en 1646 av. J.-C., l'éruption volcanique du volcan de Théra (Santorin) a expulsé un volume de ponces estimé à 40 km<sup>3</sup> (250.000 tonnes /sec) à une altitude atteignant 36 et 39 km. (Pyle 1990). Le Tsunami qui en a résulté aurait anéanti la civilisation Minoenne basée en Crète (à 70 km). Le climat s'en trouve perturbé pendant une dizaine d'années au Moyen-Orient. Cette catastrophe a été décrite dans les dix plaies d'Egypte. L'hiver volcanique a été décrit à l'époque : "d'un brouillard jaune, d'un soleil pâle, de gelées en juillet, de famine et de dessèchement des cinq sortes de céréales".

En 531 (+/-20), l'éruption du volcan Ilopango (Salvador) a projeté dans l'atmosphère d'énormes quantités de dioxyde de soufre. Une période d'hiver volcanique a duré 15 ans et est probablement une des causes de la mini glaciation de Göschenen II. Cet événement coïncide avec la tragédie Constantinople en 541, qui a été suivie d'une épidémie de choléra.

En 1815, l'éruption du volcan Tambora (Indonésie) a rejeté des quantités énormes de soufre et a causé les famines de XIXe siècle.

En 1991-1992, durant l'éruption du volcan Pinatubo, nous avons eu un refroidissement, et un creux de CO<sub>2</sub>.

Il a existé de tous temps une corrélation entre température et concentrations en CO<sub>2</sub> (fig. 8). En analysant ces courbes avec attention, on observe que les variations de concentrations en CO<sub>2</sub> sont décalées dans le temps par rapport aux élévations de température : il n'y a pas simultanément, mais un retard dans l'évolution des concentrations en dioxyde de carbone (fig 9)<sup>10</sup>.

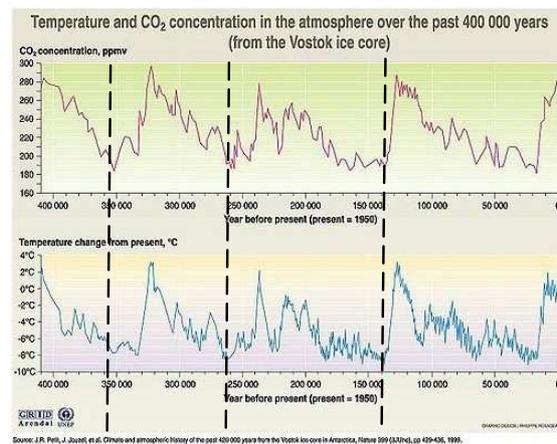
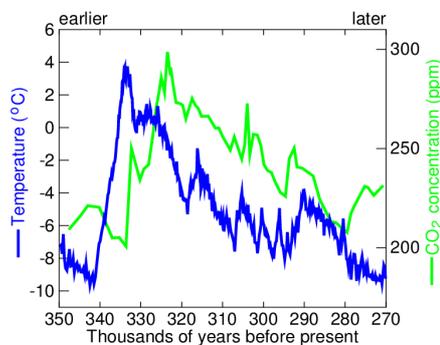


Fig.8 : corrélation entre température et concentrations en CO<sub>2</sub>



[Fig. 9 : décalage entre pics de température et pics de CO<sub>2</sub> (PANGEA project)

<sup>10</sup> A. Indermühle, et al., Geophysical Letters, vol. 27, p. 735-738 (2000).

Rappelons que nous nous situons avant le début de l'ère industrielle (moitié du XIXe Siècle). Aucun phénomène naturel - hormis les éruptions volcaniques – ne peut justifier une quelconque émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette apparition de ce dioxyde de carbone ne peut donc résulter que d'autres phénomènes.

Il est bien connu que la solubilité du CO<sub>2</sub> dans les mers et océans diminue lorsque la température augmente. Donc, lorsque la température augmente, les mers et océans rejettent de fortes quantités de dioxyde de carbone. L'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone est donc une conséquence du réchauffement climatique et non l'inverse !

C'est donc le réchauffement climatique qui provoque une augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

- Lorsque la planète se trouve en fin de glaciation, et que les phénomènes perturbateurs ont été éliminés naturellement, l'apport énergétique par le soleil est plus élevé que les pertes par rayonnement de la terre : la planète se réchauffe. L'augmentation de température provoque un rejet du dioxyde de carbone dissous dans les mers et océans et une augmentation des concentrations en gaz à effet de serre. Les pertes par rayonnement augmentent et grâce à cet effet de serre, le retour à l'équilibre est plus rapide.
- Lorsque l'énergie reçue par le soleil est égale aux pertes par rayonnement de la Terre, un « équilibre thermique » s'installe et une température de régime de l'ordre de trois degrés supérieurs à la situation actuelle a été atteinte (fig.4).
- Pendant une période interglaciaire, les fluctuations de température sont dues aux modifications du cycle solaire et à des éruptions volcaniques d'amplitude modérée.

L'analyse des variations de climat pendant les périodes interglaciaires et plus récemment, les 500 dernières années, fait apparaître le rôle majeur de l'activité solaire et de la position de la Terre par rapport au Soleil sur son orbite (fig. 4 et 5).

On ne peut nier que la température de la terre est influencée par l'ensoleillement<sup>11</sup>.

## 4.- L'acteur principal : le Soleil.

### 4.1.- Le Soleil

Le Soleil est un corps relativement simple, constitué d'environ 75 pour cent d'hydrogène, 25 pour cent d'hélium (et une quantité infime d'éléments plus lourds).

Le noyau est la partie dans laquelle l'énergie du Soleil est créée grâce à des réactions nucléaires de fusion d'hydrogène en hélium. La température y est extrêmement élevée, et provoque un rayonnement complexe.

Une partie du rayonnement galactique est dévié par le champ magnétique transporté par le vent solaire V12. Les caractéristiques, notamment magnétiques, du vent solaire varient avec l'activité solaire et induisent un champ qui repousse le rayonnement cosmique de la Terre.

***Ainsi, ce rayonnement atteignant la Terre est moindre lorsque l'activité solaire est forte.*** Au niveau de la Terre, le rayonnement suit donc, comme l'activité du soleil, un cycle de onze ans. Environ tous les onze ans, le Soleil a des d'activités plus intenses et devient plus brillant, plus actif (fig. 10, 11, 12). La photosphère se couvre alors de taches noires, appelées taches solaires (éruptions solaires protubérances). Le nombre de ces dernières augmente suivant l'importance de l'activité. Si on tient compte d'une inversion de polarité en fin de chaque cycle, on parle de cycles de 22 ans.

<sup>11</sup> Ensoleillement : voir paragraphe 4

<sup>12</sup> atmosphère du Soleil laisse échapper en permanence un flux de particules qui remplit tout le milieu interplanétaire, que l'on appelle le vent solaire

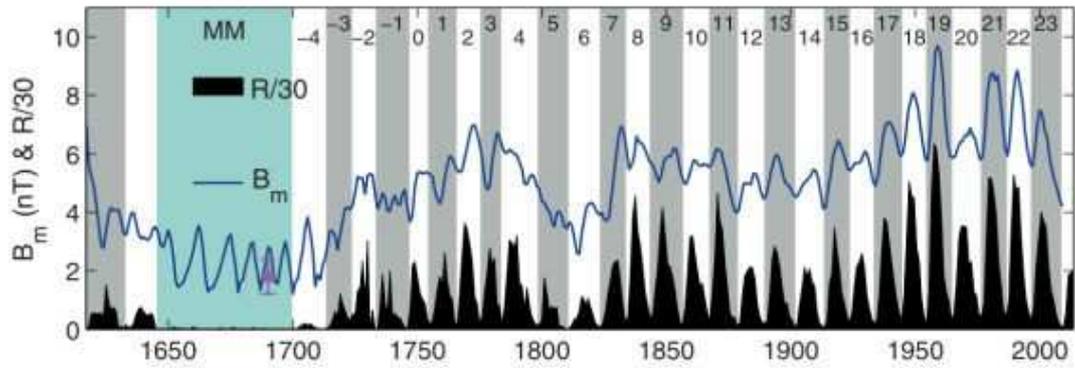


Fig. 10 : Nombre de taches solaires (/30)

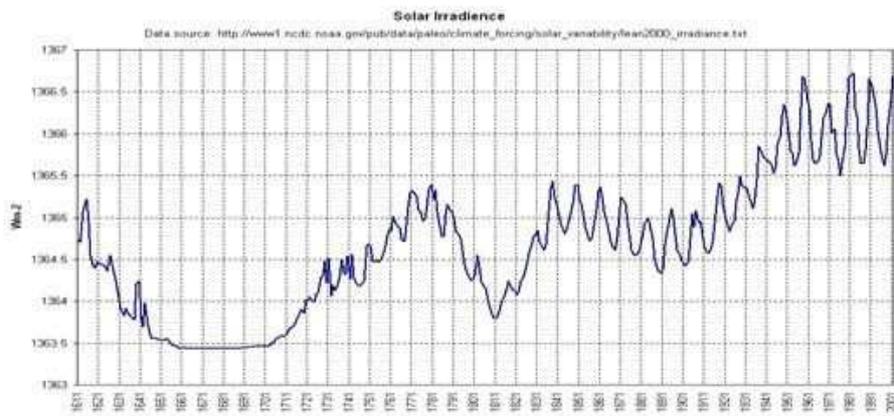


Fig. 11 : Reconstitution (source NOAA) de la variation d'irradiance Solaire ( $W/m^2$ ) entre 1611 et 2001.

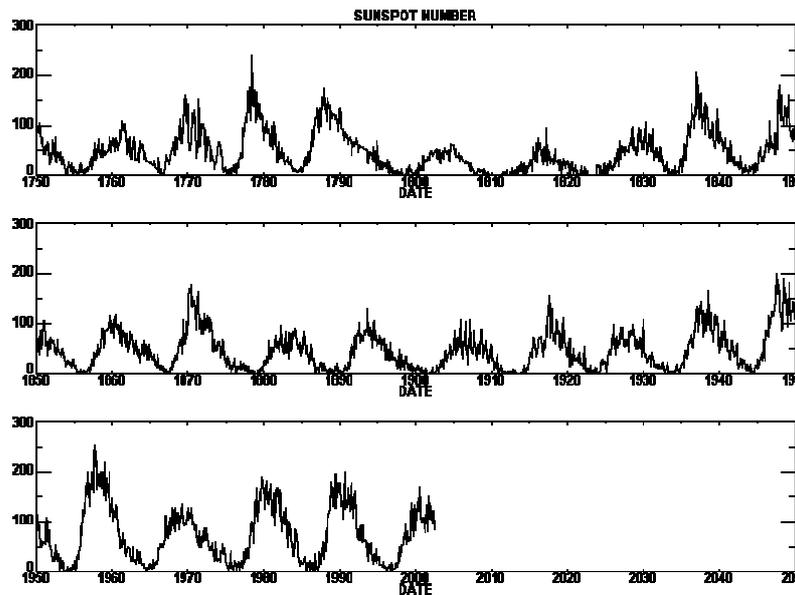


Fig. 12 : Moyennes du nombre de Wolf sur 12 mois autour des maxima. Les années en abscisse correspondent aux maxima.

Rappelons que le rayonnement atteignant la Terre est moindre lorsque l'activité solaire est forte.

L'activité solaire peut donc être caractérisée par trois paramètres (fig. 13):

- le nombre de taches solaires  $R$  (nombre de Wolf),
- vent solaire  $V$ ,
- le champ magnétique interplanétaire  $B$

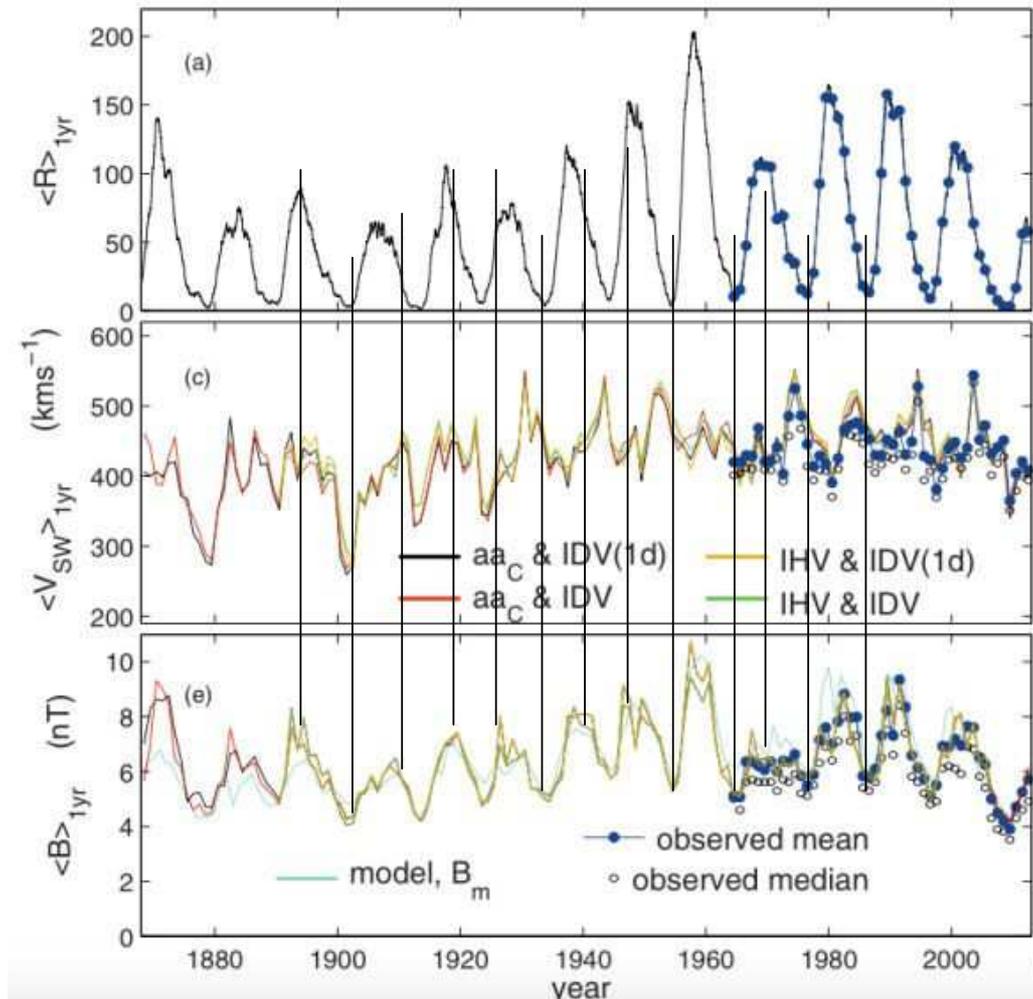


Fig. 13 : périodicité des trois paramètres  $R$ ,  $V$  et  $B^{13}$

En plus de la périodicité de 11/22 ans, il y a une périodicité d'environ cent ans depuis la fin du minimum de Maunder avec trois optima, 1720-1800, 1820-1880 et enfin 1920-2000 (fig. 14).

<sup>13</sup> Jacques Henry, Changement climatique : activité solaire et âge glaciaire à venir, Sources : The Astrophysical Journal Letters ( doi:10.1088/2041-8205/781/1/L7 ), Journal of Geophysical Research, doi:10.1002/2014JA019972 ), doi:10.1002/2014JA019970 ), doi:10.1002/2014JA019973 ) et enfin Annales Geophysicae 32(4). pp. 367-381, ISSN 1432-0576

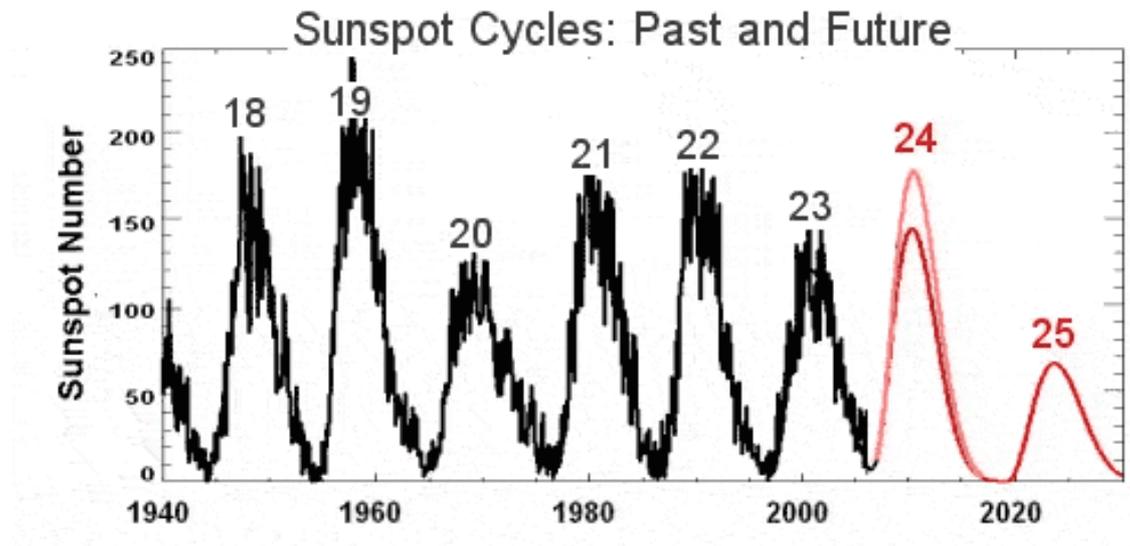


Fig. 14 : Prédiction du cycle solaire N°24 et 25 d'après la NASA (fin 2006).

#### 4.2.- Le rayonnement solaire

Un corps chaud comme le Soleil émet sur tout le spectre. Il nous envoie un flux d'énergie dominé par la partie visible du spectre. Ce flux d'énergie arrive sur Terre sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement électromagnétique se décompose en ondes radio et millimétriques, en émissions dans l'infrarouge (800 – 1.400 nm), le visible (400 - 800 nm) et l'ultraviolet (200 - 400 nm) et, au-delà, en rayons X et gamma.

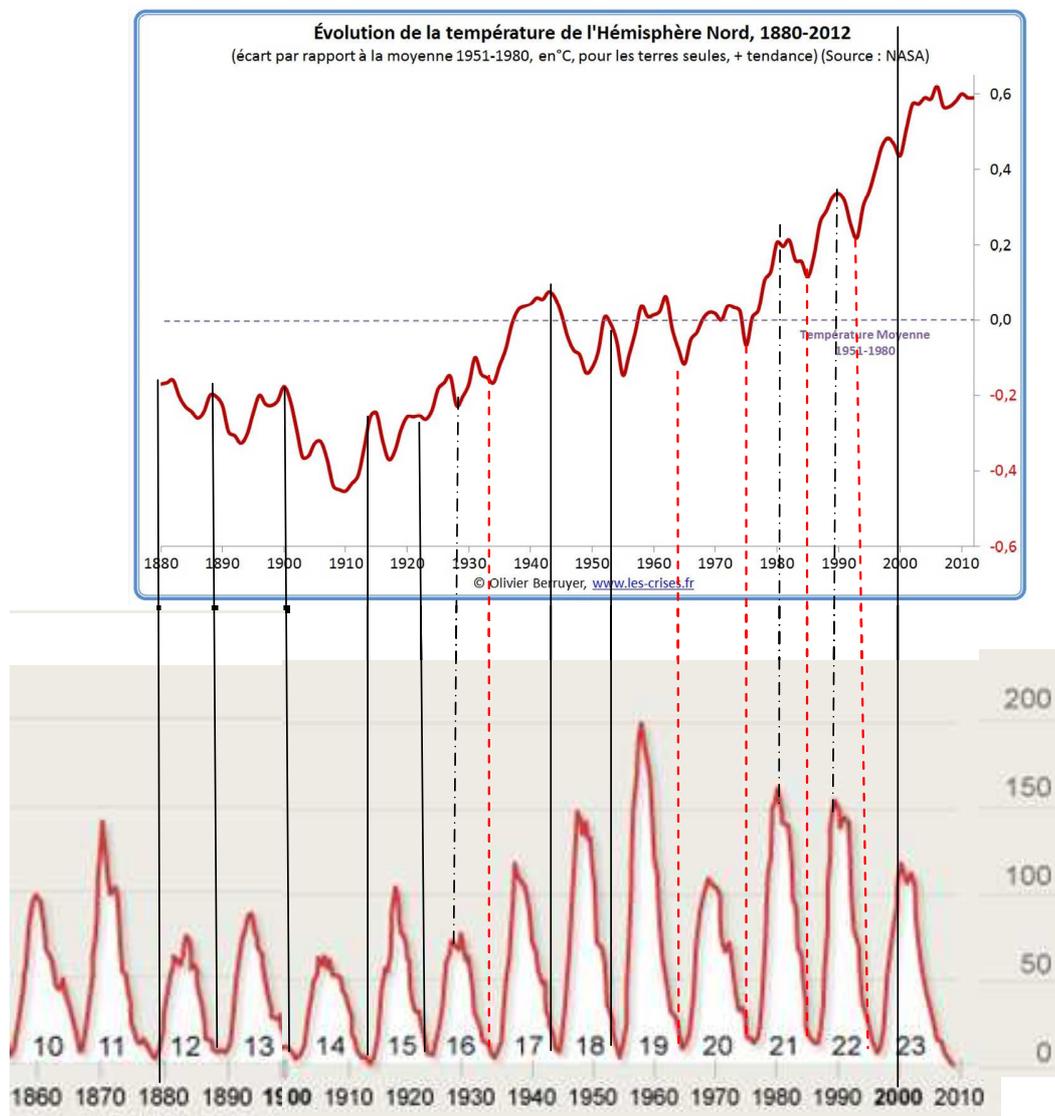
L'énergie solaire reçue par la Terre n'est pas constante dans le temps. Le cycle solaire, d'une périodicité de 11 ans, est observé depuis des siècles à travers la variation du nombre de taches à la surface du Soleil. Le flux d'énergie émis par le Soleil ne varie cependant que d'un millième environ au cours d'un tel cycle.

La position de la terre sur son orbite a une influence sur la quantité d'énergie reçue.

- **L'excentricité** est l'un des facteurs les plus importants dans les changements climatiques. Au périhélie, la terre peut recevoir de 20 à 30 % d'énergie de plus qu'à l'aphélie.
- **L'obliquité** possède une influence sur les saisons.

### 4.3.- Cycles solaires et climat

On peut observer une certaine correspondance entre les fluctuations de température et les différents cycles solaires (fig. 14 et 15).



**Fig. 15 : températures et cycles solaires (nombre de taches solaires (avec max de 200)**  
 (nombre de taches plus élevé correspond à plus d'activité solaire et plus faible rayonnement solaire)

- correspondance entre minimas d'activité et maximas de température
- ..... correspondance entre maximas d'activité et minimas de température
- simultanèité entre minimas d'activité et minimum de température (!!)

On peut donc conclure qu'en dehors des catastrophes naturelles (volcanisme et chutes de météores) qui provoquent des modifications drastiques du climat, l'activité solaire a un effet non négligeable sur la température à la surface de la terre.

Pour la période qui précède la révolution industrielle, il est incontestable que les variations de concentration en dioxyde de carbone sont une conséquence des réchauffements climatiques et non l'inverse.

Nous allons à présent nous intéresser au climat après la révolution industrielle, c-à-d de la moitié du XIXe Siècle à nos jours.

## **5.- L'acteur secondaire : l'Homme.**

De par ses activités, l'homme n'a pu avoir aucune influence sur le climat jusqu'à la moitié du XIXe S.

Depuis 1860, l'évolution de la température du globe suit une courbe ascendante (fig.15a).

La situation n'est toutefois pas comparable à celle de l'époque Holocène où la température moyenne était supérieure de 1°C à la température moyenne actuelle.

Si la notion de température moyenne est très discutable, la preuve du réchauffement climatique actuel est indiscutable : le recul des glaciers et la fonte des calottes glaciaires sont des témoins réels de ce réchauffement.

Un tel type de réchauffement s'est déjà produit par le passé, la Terre évoluant normalement vers un équilibre thermique de à 2°C à 3°C de plus de la moyenne actuelle.

La question est de savoir dans quelle mesure l'activité humaine peut accélérer ce réchauffement : c'est l'objectif principal du GIEC<sup>14</sup>.

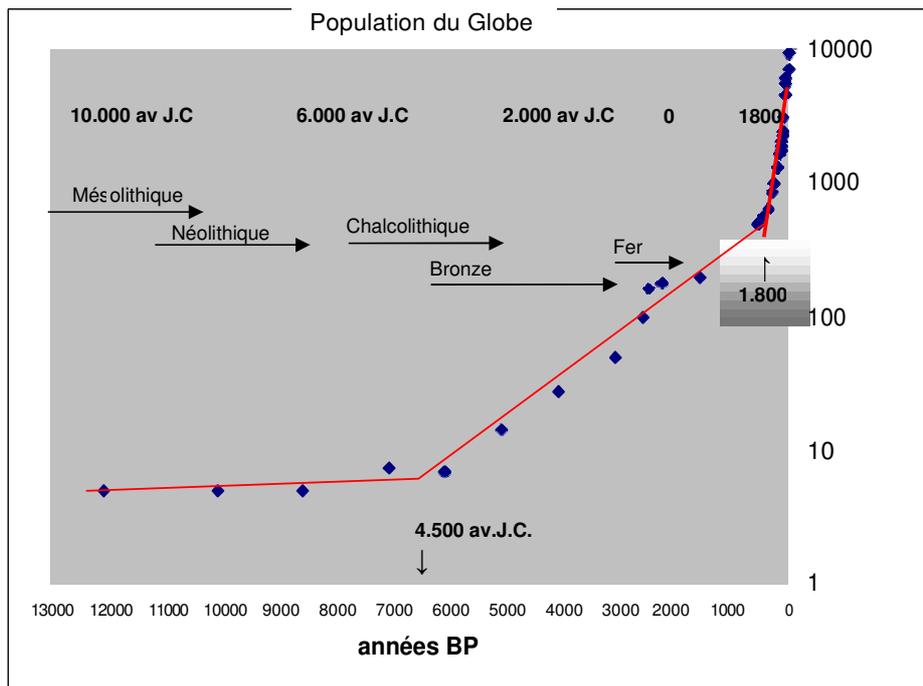
### **5.1.- la population mondiale**

Il devait avoir de 2 à 20 millions d'habitants il y a 74.000 ans, lors de l'éruption du volcan de Toba (Sumatra). Au cours de ce que l'on pouvait bien appeler un "hiver volcanique", sans doute "60% des êtres humains auraient été anéantis".

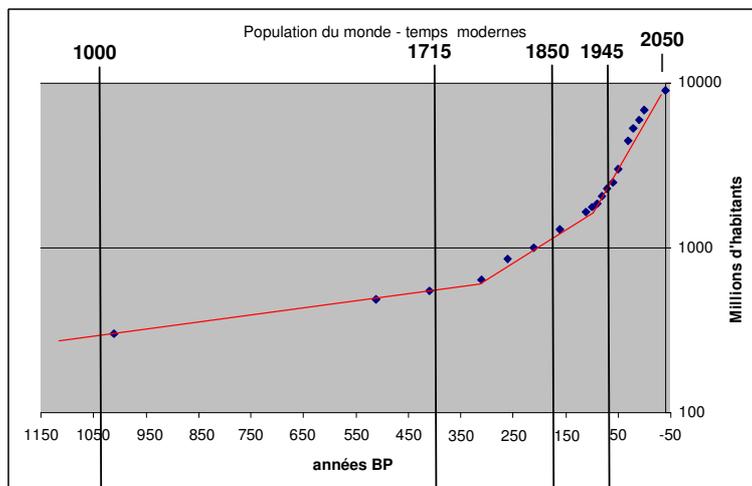
La croissance démographique est exponentielle et se représente par des droites en coordonnées semi-logarithmiques (Fig.16 et 17).

---

<sup>14</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)



**Fig. 16 : évolution de la population mondiale depuis 13.000 ans**



**Fig. 17 : évolution de la population mondiale pré- et post- industrielle**

Des origines au début de l'âge du bronze (4.000 av J.C.), la population du globe est en légère croissance. Dans le seconde partie du Néolithique et au début de l'âge du bronze, on passe à un doublement de la population en 1.000 ans. Puis vers 4.500 av J.C, la population double en 500 ans (0,04% par an). Les échanges commerciaux s'intensifient et les grandes villes hittites se développent.

Ce rythme de croissance se maintien à l'âge du fer et jusqu'à la grande révolution industrielle à la fin du XVIIIe siècle. On passe alors à une croissance de 2% habitants par an, soit à un doublement de la population du globe en 35 ans ! Contrairement aux zones rurales, c'est essentiellement en zones urbaines que l'explosion démographique est présente.

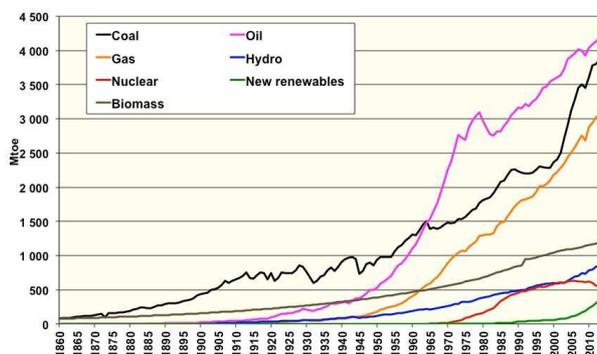
Ces courbes présentent quelques tassements liés à des pandémies ou à des guerres. Ainsi, la seconde guerre mondiale a coûté la vie à près de 60 millions d'habitants sur 2,3 milliards, soit 2,6% de la population du globe. De 1860 à 2012, la population mondiale a été multipliée par 7.

Si la croissance de la population mondiale se poursuit à ce rythme, on devrait atteindre 15 milliards d'habitants en 2050. Nous verrons que ce rythme infernal ne peut être maintenu, au risque d'atteindre les limites disponibles sur notre planète, notamment pour l'espace vital, l'atmosphère, l'eau, la nourriture et ... l'énergie.

## 5.2.- la consommation d'énergie.

La consommation énergétique mondiale était de  $0,6 \times 10^{12}$  GJ en 2012. Pour une population de 7 milliards d'habitants, cela correspond à 85 GJ par personne et par an (23,6 MWh).

La figure 18 montre l'évolution de la contribution de chaque source d'énergie au cours des deux derniers siècles.

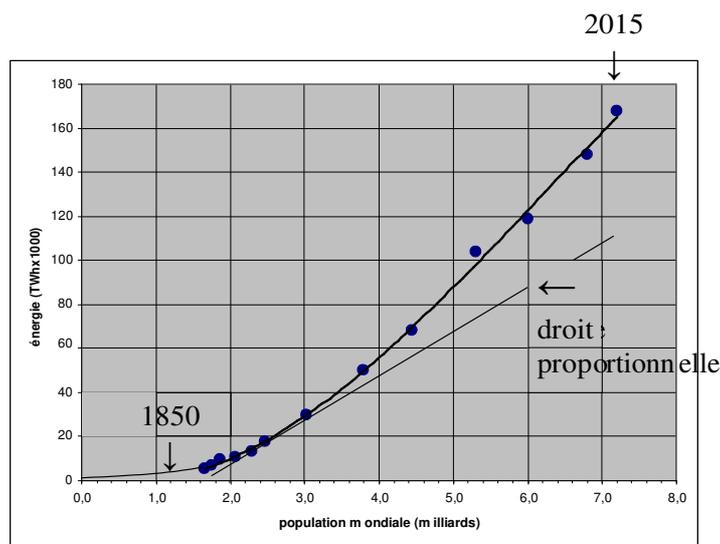


**Fig. 18 : consommation d'énergie dans le Monde depuis 1860**

(millions de tonnes équivalent pétrole (une tonne équivalent pétrole = 42 gigajoules = 11600 kWh).

Source Shilling et al., 1977, et BP Statistical Review, 2015

Sur les dernières décennies, on remarque que 80 % environ proviennent des carburants fossiles. Les contributions de l'énergie nucléaire et de l'hydroélectricité se valent. © EDP Sciences



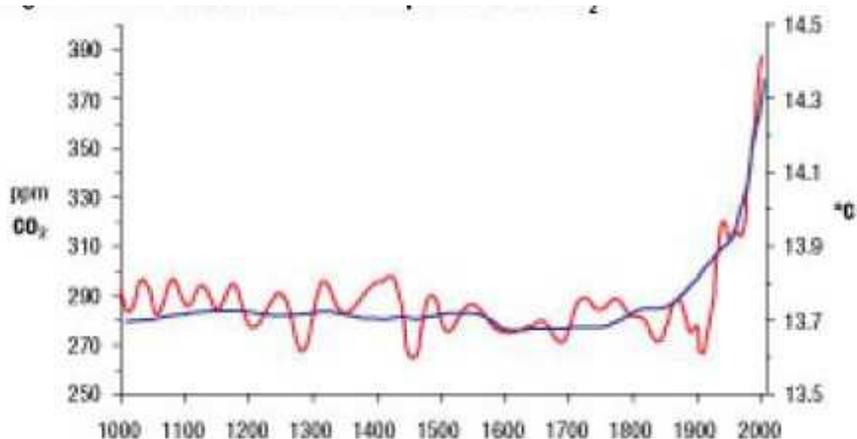
**Fig. 19 : consommation d'énergie primaire et population mondiale**

De 1860 à 2012, la population mondiale a été multipliée par 7. Pendant la même période, la consommation mondiale d'énergie a été multipliée par 35 (fig.19) et la consommation d'énergie par tête d'habitant a été multipliée par 5 !

### 6.- Le climat pendant la période industrielle.

La figure 16 représente l'évolution des températures de l'hémisphère Nord depuis le début de l'ère industrielle.

La figure 20 fait apparaître clairement la rupture climatique qui intervient à partir de la seconde moitié du XIXe siècle.



*Fig. 20 : climat avant et pendant l'ère industrielle*

En 152 ans, la consommation moyenne d'énergie par tête d'habitant a été multipliée par 4,72 ! Le bilan thermique de la figure 6 doit être corrigé pour inclure la consommation exponentielle d'énergie (fig.19) liée à la forte croissance démographique et à l'industrialisation.

### 6.1- Le bilan thermique

Le bilan thermique de la planète doit donc être complété pour tenir compte de cette évolution. En effet, il faut tenir compte de la totalité de l'énergie consommée sur terre dès lors que – à quelques exceptions près<sup>15</sup> – toute l'énergie consommée se transforme finalement en chaleur. Les 165.000 TWh/an sont à ajouter au niveau du sol aux  $740.10^6$  TWh ( $174 \text{ W/m}^2$ ) du rayonnement solaire au niveau du sol, soit 0,02% (fig.21). Ce terme semble marginal par rapport aux autres éléments du bilan.

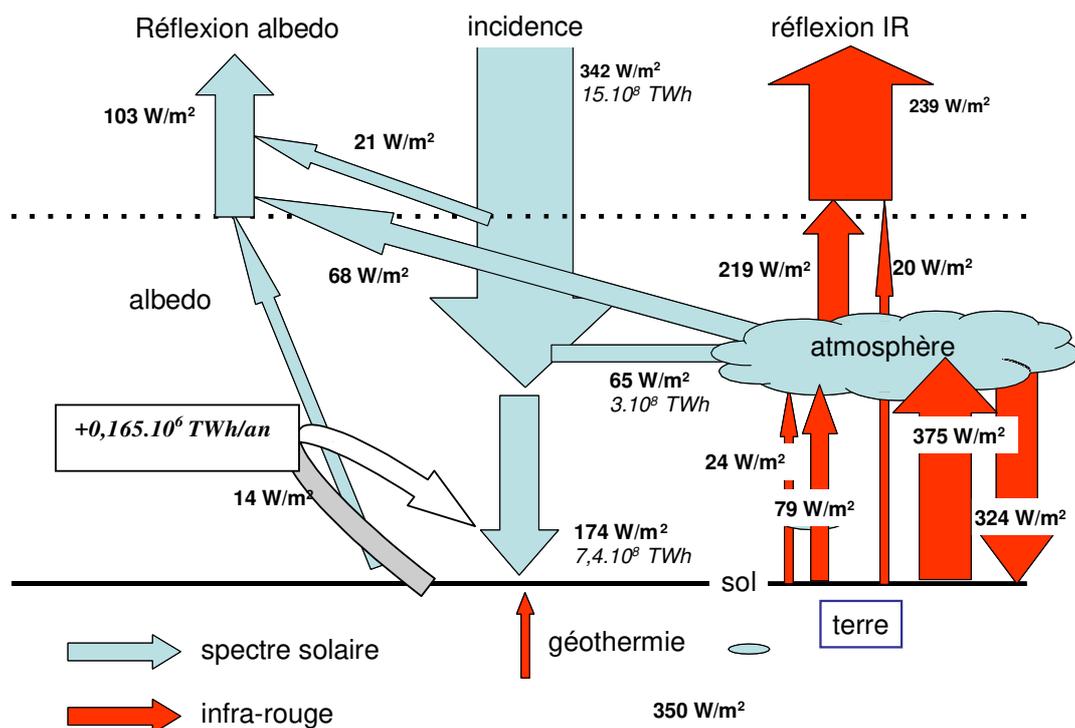


Fig. 21 : bilan thermique de la terre après 1860

L'énergie dépensée par l'Homme ne se répartit pas également sur toute la surface du globe. En effet, 70% de cette surface est occupée par des mers et des océans. Sur les 30% des terres, 89% sont habitables. La population mondiale n'est pas répartie uniformément et se concentre essentiellement en Asie et en Europe (fig. 22).

Continents	Millions habitants	Millions de $\text{km}^2$	Habitants/ $\text{km}^2$
Afrique	1.154	30	38
Amérique	969	42	23
<b>Asie</b>	<b>4.474</b>	<b>44</b>	<b>102</b>
<b>Europe</b>	<b>604</b>	<b>10</b>	<b>60</b>
Océanie	37	9	4
Antarctique	0,0015	14	0
Total	7.238	149	

Fig. 22 : population mondiale par continent et densités de population.

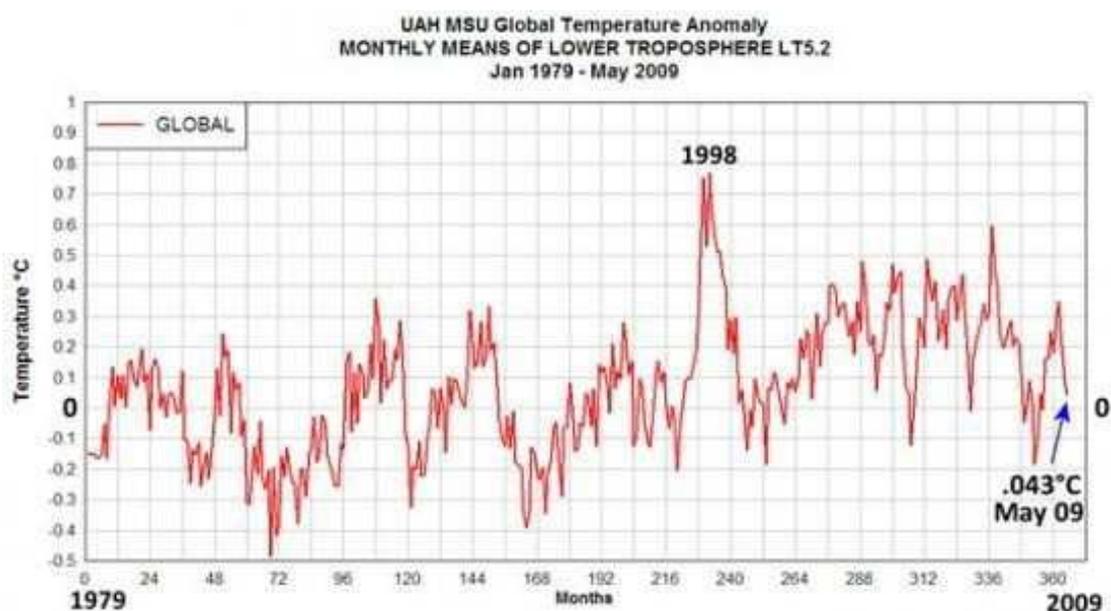
<sup>15</sup> Les transformations d'énergie thermique en énergies mécaniques, en énergie chimique, ... ne sont pas à prendre en considération. Exemples : stations pompes, production de métaux à partir de minerais ( $15.000 \text{ kWh}$  à la tonne d'aluminium produit), stockage d'énergie, ...

70% de la population mondiale est concentrée sur 10% de la surface du globe. L'impact de cette partie de la population sur les climats locaux n'est donc pas négligeable. En effet, en 2050, l'impact de la dépense énergétique par l'Homme sur le bilan thermique de la planète pourrait *atteindre localement*  $8,5\text{W/m}^2$ , c-à-d 35% de l'énergie dépensée dans des phénomènes de diffusion et convection à la surface de la terre (poste D3 du bilan thermique) ou 19% de l'énergie réémise par la terre dans des phénomènes de diffusion et convection et en rayonnement direct vers l'espace (postes D3 et D4 du bilan thermique). Des micro-climats sont ainsi engendrés, qui peuvent influencer les échanges thermiques dans la troposphère

On voit donc que l'énergie *dépensée localement* par l'Homme sur la terre n'est plus négligeable par rapport aux flux d'énergie qui régissent le bilan thermique de la planète.

## 6.2 - Evolution actuelle du climat.

Les figures 23 et 24 font clairement apparaître que la tendance au réchauffement n'est pas si évidente.



*Fig. 23 : Variations récentes de la moyenne des températures globales de la basse atmosphère de la Terre.*

Depuis 1910, en 105 ans, l'augmentation de température est de  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De 1998 à 2013, on observe une certaine stabilisation de la température.

« Aujourd'hui, la Terre se rafraîchit depuis 2002 en dépit d'une hausse continue et rapide des émissions globales de  $\text{CO}_2$  ([Norm Kalmanovitch](#)) ».

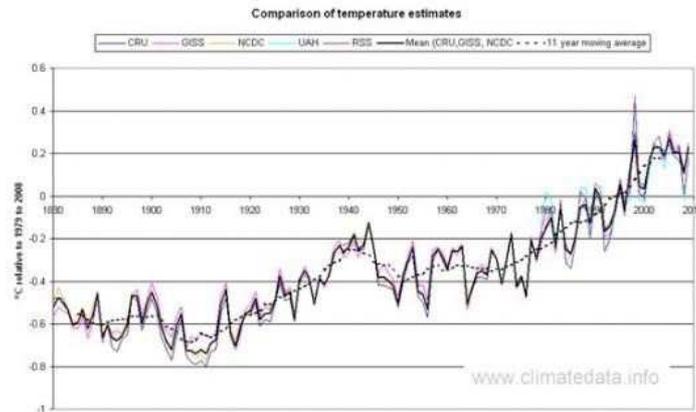


Fig. 24 : Relevé de la température moyenne du globe par les principaux organismes mondiaux.

### 6.3 - Les autres acteurs intervenant dans la stabilité du climat.

Les principaux facteurs pouvant causer des perturbations climatiques ont été évoqués ci-dessus : les catastrophes naturelles, les cycles solaires, la position de la terre sur son orbite, l'action de l'Homme.

D'autres acteurs sont à prendre en considération : autres gaz à effet de serre, facteurs thermodynamiques et cinétiques et le rôle essentiel de la biosphère.

#### 1. D'autres gaz à effet de serre

Le gaz le plus important de par sa contribution à l'effet de serre est la vapeur d'eau H<sub>2</sub>O (55 %). Suivent le CO<sub>2</sub> (39 %), le protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O (2 %), le méthane CH<sub>4</sub> (2 %), l'ozone O<sub>3</sub> (2 %) , les aérosols et dans des proportions moindres, les chlorofluorocarbones (CFC).

Le méthane et les oxydes d'azote évoluent de manière semblable à celle du dioxyde de carbone (fig.25).

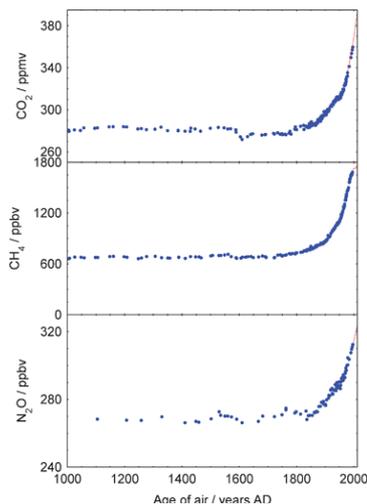


Fig. 25 : concentrations en CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O dans la troposphère

Ceci montre bien que le dioxyde de carbone n'est pas le seul composé à mettre en cause, et donc la combustion des combustibles fossiles n'est pas le seul élément à prendre en considération.

## 2. Le rôle régulateur de la Thermodynamique et de la Cinétique.

Il est bien connu que tout système en équilibre réagit face à des contraintes extérieures pour rétablir son état initial : c'est le Principe de Le Chatelier :

« Lorsque les modifications extérieures apportées à un système physico-chimique en équilibre provoquent une évolution vers un nouvel état d'équilibre, l'évolution s'oppose aux perturbations qui l'ont engendrée et en modère l'effet. »

C'est ainsi que par tous les temps, la terre a toujours évolué vers un même équilibre thermique, de l'ordre de 2°C à 3°C de plus que la température actuelle (fig.2).

Le CO<sub>2</sub> atmosphérique est solubilisé par les eaux de pluie (pluies acides) et dans les mers et océans. Ce dioxyde de carbone se trouve alors sous 3 formes : molécules (CO<sub>2aq</sub>), d'ions Hydrogénocarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et sous forme d'ions Carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>).

Lorsque la température de ces océans augmente, la solubilité diminue d'environ 0,6 g/l par 10°C, ce qui justifie le relargage de grandes quantités de dioxyde de carbone dans la troposphère après une glaciation : l'effet de serre augmente et la terre se réchauffe donc tout naturellement.

Les vitesses des réactions de photosynthèse chlorophyllienne et de carbonatation sont sensiblement accrues lorsque la concentration en dioxyde de carbone augmente.

Suite à l'échauffement climatique, l'évaporation de l'eau augmente, ce qui entraîne une augmentation de la filtration du rayonnement solaire, une augmentation du terme D2 du bilan thermique et une diminution de l'impact du réchauffement.

On ne peut ignorer le second principe de la thermodynamique et l'effet entropique qui conduit à augmenter le désordre, par exemple déplacer les zones arides vers les zones humides ou l'inverse.

## 3. Le rôle régulateur de la biosphère.

Lors du réchauffement climatique, les périodes hivernales diminuent et l'activité chlorophyllienne annuelle augmente entraînant donc une meilleure capture du dioxyde de carbone. Les variations cycliques (fig. 26) font bien apparaître les croissances en CO<sub>2</sub> pendant les périodes hivernales et les décroissances en périodes d'activité photovoltaïque. Une légère augmentation de la durée de ces dernières périodes aura une influence prépondérante sur la tendance résultante.

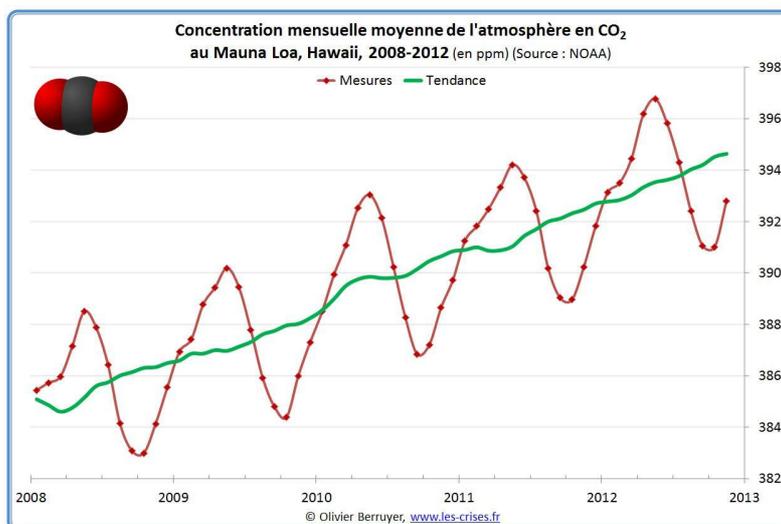


Fig. 26 : évolution des concentrations en CO<sub>2</sub> été et hiver.

La croissance des arbres dépend de leur espèce. A l'état adulte, un arbre séquestre du carbone en assimilant du dioxyde de carbone par le processus de photosynthèse chlorophyllienne. Il en résulte un rythme de croissance de 15 à 20 kg par an.

Si on prend une forêt de feuillus de 400 arbres à l'hectare, elle atteint à maturité en une trentaine d'année une masse totale de bois de 500 à 600 tonnes. Cette forêt de 1 hectare a un potentiel de capture du CO<sub>2</sub> de 3 à 4 tonnes par an.

La croissance d'un arbre se fait au rythme de l'ordre de 12 kg par an alors que leur combustion dans une centrale à biomasse de 150MW<sup>16</sup> se fait à raison de 3 arbres par heure ! Il ne s'agit absolument pas d'énergie renouvelable, les rythmes de croissance et de combustion étant hors proportion : 12 kg/an en croissance et 4t/h en combustion !

Il est donc essentiel de protéger les surfaces forestières du monde et de **condamner totalement** leur exploitation en vue d'alimenter des centrales électriques à biomasse<sup>17,18</sup>.

## 7.- Conclusion et perspectives d'avenir.

Depuis 400.000 ans, notre planète a subi plusieurs agressions violentes (cataclysmes, éruptions volcaniques, chutes de météores, ..) et s'est chaque fois relevée : elle a connu plusieurs réchauffements climatiques qui ont plafonné à quelques degrés au-dessus de la température moyenne actuelle. Les deux acteurs principaux de cette stabilisation sont l'augmentation des pertes par rayonnement (proportionnelles à la puissance 4 de la température<sup>19</sup>) et l'augmentation de l'activité de la biomasse végétale.

Pendant les périodes interglaciaires, les températures se sont relevées de 10 à 12°C<sup>20</sup>, ce qui témoigne chaque fois d'un retour à l'équilibre thermique (fig.2). Ces réchauffements ont toujours été suivis d'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans la troposphère en raison du relarguage du CO<sub>2</sub> par les mers et océans. Ce phénomène a augmenté chaque fois l'effet de serre et a accéléré le retour à l'équilibre thermique. Après le retour à l'équilibre, les températures se stabilisent et sont influencées essentiellement par les cycles solaires (fig. 23). Cet effet de serre joue un rôle régulateur du climat et assure une température moyenne actuelle de 15 °C.

Le réchauffement climatique actuel est bien réel ainsi qu'en témoignent le recul des glaciers et la fonte des calottes glaciaires. Ce réchauffement climatique est le résultat d'une agression sans précédent, l'activité humaine produit quantité de gaz et particules à effet de serre et génère une énorme quantité d'énergie à la surface du globe. Notre planète réagit à ces nouvelles agressions, mais l'Homme a la responsabilité de limiter ces effets dévastateurs.

---

<sup>16</sup> Projet EON de centrale à Biomasse à Gardanne (F) prévue pour une consommation annuelle de 1 million de tonnes de bois.

<sup>17</sup> André Fontana, Energies alternatives, énergies renouvelables, énergies vertes, Working Papers CEB, ULB -- Université Libre de Bruxelles <http://EconPapers.repec.org/RePEc:sol:wpaper:2013/152951>, <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/152951/1/wp13052.pdf>

<sup>18</sup> Energies alternatives, énergies renouvelables, énergies vertes: 2<sup>e</sup> partie : la biomasse et climat, Working Papers CEB, ULB, Université Libre de Bruxelles, <http://EconPapers.repec.org/RePEc:sol:wpaper:2013/221883>, <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/221883/3/wp15049.pdf>

<sup>19</sup> Loi de Stefan Boltzmann

<sup>20</sup> Pour atteindre des températures de l'ordre de 3 degrés supérieurs à la situation actuelle.

L'augmentation des températures que l'on constate actuellement (fig.24) est donc liée à trois facteurs principaux : des apports locaux d'énergie supplémentaire dans le bilan thermique de la planète,

- l'augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère liée au réchauffement et aux émissions de dioxyde de carbone liées à l'utilisation des combustibles fossiles
- des émissions d'autres gaz à effet de serre (méthane, oxydes d'azote, ...)

L'usage des combustibles fossiles est inéluctable si on tient compte de l'évolution de la population mondiale et de ses attentes. La responsabilité de l'Homme réside plus dans l'utilisation rationnelle de l'énergie pour casser la courbe actuelle de croissance exponentielle de consommation d'énergie primaire.

La décision d'abandonner rapidement l'usage des combustibles fossiles entraînera de facto un développement de la filière nucléaire. Celui-ci présentera un réel danger, incomparable à l'effet des augmentations des émissions de dioxyde de carbone, c'est le risque d'accident nucléaire, irréversible, et omniprésent au regard des catastrophes passées. La multiplication des sites nucléaires seront autant de cibles pour des attaques terroristes, et d'installations prêtes à la production d'armes.

La biosphère joue un rôle régulateur dont notre planète ne peut se passer : respectons-la, protégeons-la et développons-la.

L'Histoire nous a montré qu'il existe des modes de régulation brutaux et non prévisibles : les éruptions volcaniques (les chutes de météores sont beaucoup moins probables).

L'Homme a entre les mains des atouts majeurs ;

- La protection de la biosphère
- L'utilisation rationnelle de l'énergie,
- Le développement des énergies renouvelables en prévision d'une sortie inéluctable du nucléaire