

Approche expérimentale du réchauffement climatique depuis 1960

Hervé Nifenecker

11 janvier 2013

Résumé

A partir des données, accessibles sur Internet, sur l'évolution de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère et sur la quantité annuelle de CO₂ produite par la combustion des combustibles fossiles et la déforestation, on montre qu'environ 50% cette dernière se retrouve dans l'atmosphère. On confirme ainsi que l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère ne peut s'expliquer simplement (selon le critère du rasoir d'Ockam) que comme le résultat des activités humaines. L'humanité fait donc, depuis 1960, une expérience visant à observer les effets de l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Nous montrons ici que l'augmentation observée de la température moyenne de l'atmosphère terrestre est fortement et linéairement (dans le domaine des mesures) corrélée (avec un facteur de corrélation de 0,93) à celle de la concentration de CO₂. Appliquant le critère d'Ockam on constate que seule la théorie de l'effet de serre explique cette corrélation de façon satisfaisante. Inversement, si une telle corrélation n'était pas observée la théorie de l'effet de serre serait falsifiée.

Le réassureur Munich-Re fournit les statistiques du nombre de catastrophes d'origine géologiques (tremblements de terre, éruption volcaniques, tsunamis) et d'origine climatique (canicules, inondations, cyclones et tempêtes). Le nombre de catastrophes d'origine géologiques est relativement constant depuis 1980. Au contraire le nombre de catastrophes climatiques est multiplié par 3 depuis cette date.

Enfin nous montrons que les variations de l'irradiation solaire et de l'intensité de l'oscillation El Nino-La Nina ont tous deux une influence sur la température de l'ordre de 10 fois plus faible que celle de la variation de la concentration atmosphérique du CO₂.

Introduction

Certains « climato-sceptiques » utilisent des arguments plus ou moins théoriques pour justifier leur point de vue, allant jusqu'à mettre en cause le rôle des gaz à effet de serre dans le réchauffement. D'autres rappellent que le climat a changé depuis des centaines de milliers d'années alternant périodes glaciaires (et glaciales) et interglaciaires, et qu'un réchauffement de plus ne peut être la fin du monde. Si on leur oppose le fait que la concentration de CO₂ et la température globale moyenne augmentent ensemble depuis le début de l'ère industrielle, ils rétorquent que cette augmentation ne serait plus observée depuis 1998 (année record, effectivement, avec, probablement, 2005), et, parfois, que l'augmentation de la concentration du CO₂ pourrait être la conséquence et non la cause de l'augmentation de la température¹, ou

¹ Au cours de l'ère quaternaire on sait que le climat a oscillé entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires. Le facteur initiateur d'un cycle de sortie de période glaciaire est l'augmentation de l'irradiation solaire estivale aux hautes latitudes ; cette augmentation conduit à une diminution de la surface de la banquise arctique d'été, et, donc, à une baisse de l'albédo et à une plus grande absorption de la chaleur solaire.

encore, qu'une cause commune est à l'origine à la fois de l'augmentation de la concentration du CO₂ et de la température, mais n'a rien à voir avec les activités humaines.

Trop souvent les arguments portent sur les évolutions passées du climat qui souffrent d'une incertitude sur les données ; par exemple la polémique sur la courbe de Mann obscurcit le débat sur la réalité du réchauffement climatique en laissant planer un doute sur l'honnêteté des climatologues, ou ,encore le parallélisme des courbes de température et de concentration atmosphérique des gaz à effet de serre pose la question de la poule « concentration » et de l'œuf « température » à laquelle il est expérimentalement très difficile de répondre.

Or il se trouve que nous disposons de plus de 50 ans d'enregistrement détaillé de toutes les quantités qui interviennent pour caractériser l'évolution climatique globale. Pourquoi ne pas regarder ce que peuvent nous apprendre directement ces données ?

Pour échapper aux polémiques invoquant l'histoire lointaine du climat, les arguments d'autorité ou de mise en doute systématique, j'ai donc essayé de regrouper des mesures récentes des évolutions de la température et des concentrations atmosphériques de gaz carbonique qui permettraient d'asseoir les argumentations sur les faits en répondant aux questions suivantes :

1. La concentration en CO₂ augmente-t-elle ?
2. Si oui cette augmentation s'explique-t-elle par les émissions anthropiques ?
3. La température moyenne augmente-t-elle ?
4. Les deux quantités sont elles corrélées et jusqu'à quelle point ?
5. Quelles sont les conséquences du réchauffement climatique ?

J'ai utilisé les données suivantes disponibles sur Internet ;

1. L'évolution de la concentration de CO₂ mesurée au Mauna Loa : ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_mlo.txt
2. L'évolution de la température moyenne, des indices de l'oscillation Sud Pacifique et du nombre de tâches solaires, données par la NASA
3. Les émissions de CO₂ données par un site indépendant <http://co2now.org/Current-CO2/CO2-Now/global-carbon-emissions.html>
4. La masse de l'atmosphère (Wikipedia) : 5,148 10¹⁵ tonnes
5. Les statistiques du réassureur Munich Re

Concentrations en CO₂

La concentration en CO₂ de l'atmosphère est régulièrement mesurée à la station de Mauna Loa à Hawaï, loin des sources humaines. La Figure 1 montre qu'elle croît constamment depuis plus de 50 ans, sa valeur préindustrielle étant de 280 ppm

Il s'établit alors un cycle de réactions dans lesquelles l'augmentation de la température provoque un accroissement des émissions de CO₂ et de méthane et de l'évaporation d'eau, autrement dit de la concentration de gaz en effet de serre dans l'atmosphère ; à son tour, cette augmentation induit une augmentation de la température qui elle même induit une augmentation de la concentration en GES et ainsi de suite jusqu'à ce que la baisse de l'irradiation solaire estivale aux hautes latitudes conduise à une augmentation de la surface de la banquise et engage un cycle de refroidissement. On peut dire que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines sont analogues à la « prise en marche du train » d'un cycle de réchauffement.

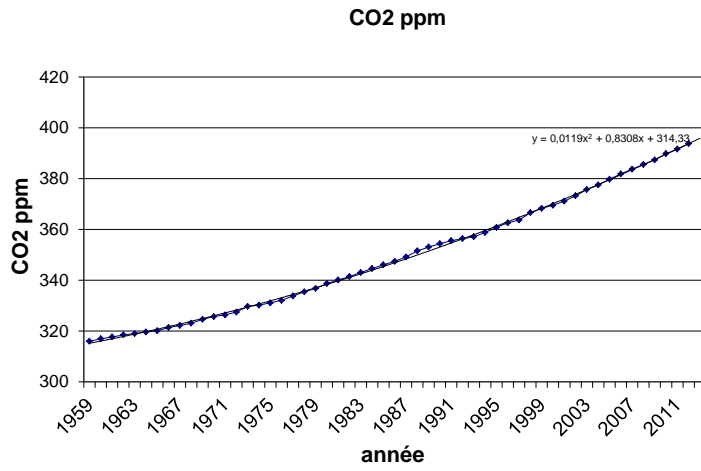


Figure 1

Evolution de la concentration du CO₂

A partir de la concentration on peut calculer la masse de CO₂ dans l'atmosphère
Notons que l'explosion du Pinatubo a eu lieu en 1991

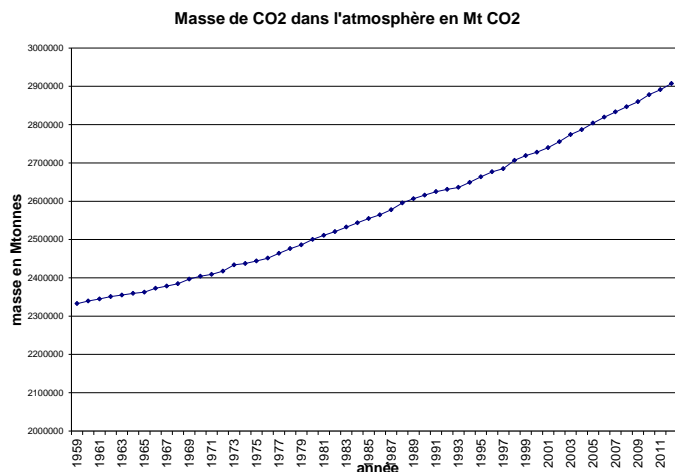


Figure 2

Evolution de la masse de CO₂ contenue dans l'atmosphère en millions de tonnes

On peut alors calculer l'accroissement annuel de la masse de CO₂ dans l'atmosphère

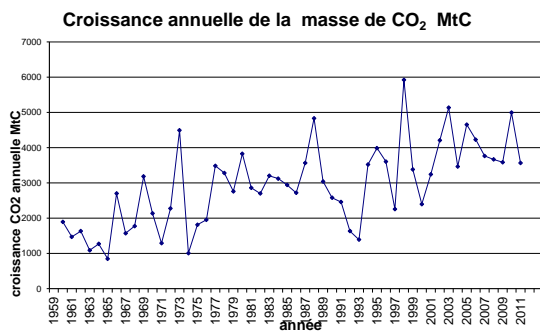


Figure 3

Croissance annuelle de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère en MtC

Actuellement l'augmentation de la masse de CO₂ dans l'atmosphère est d'environ 4 Gt équivalent C soit 15 Gt/an de CO₂

Emissions anthropiques

On doit évidemment démontrer que les émissions de CO₂ croissent du fait de la consommation des fossiles. La Figure 4 donne les émissions annuelles.

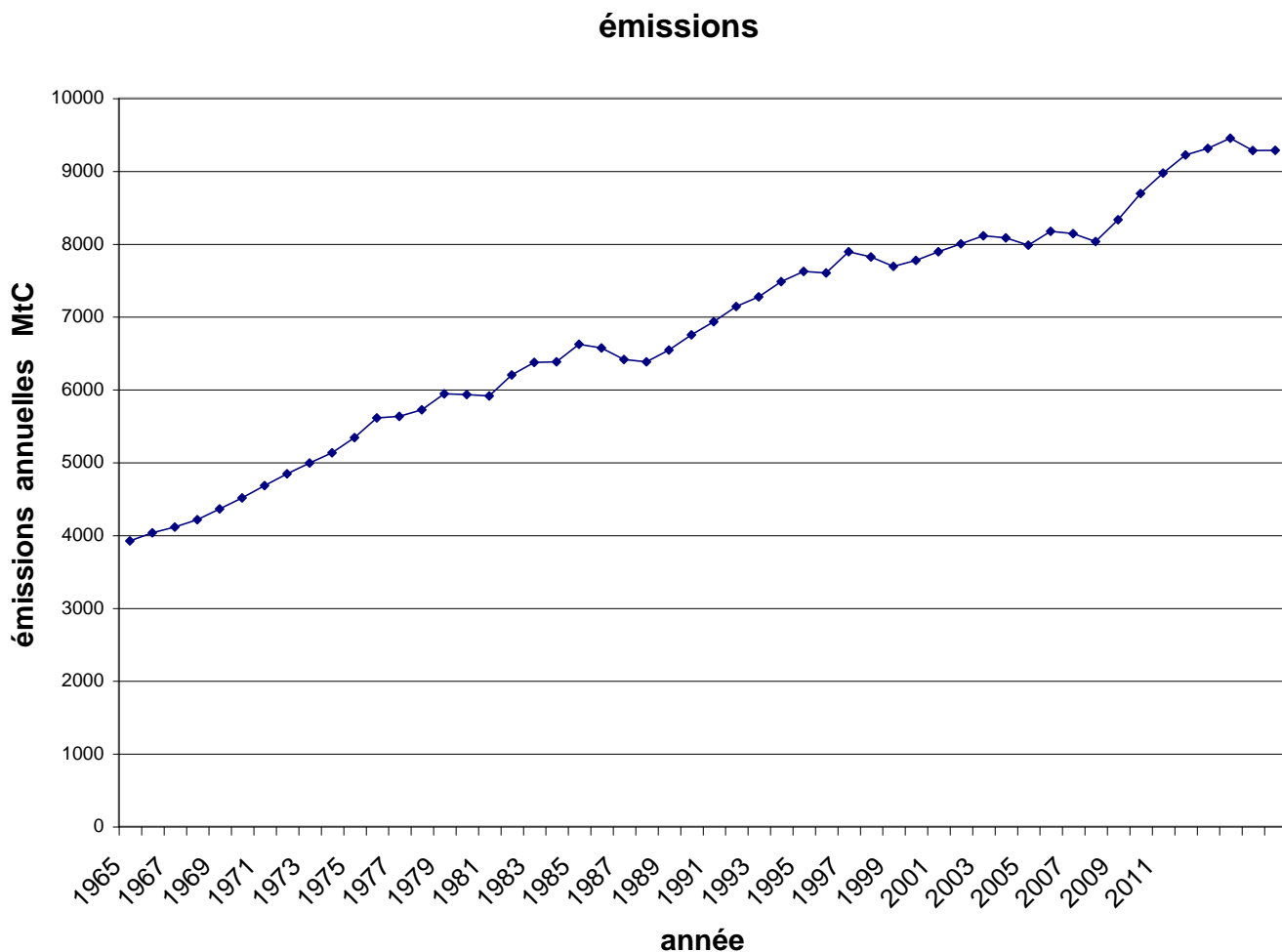


Figure 4
Evolution des émissions annuelles de CO₂ (Mt CO₂)

Les émissions anthropiques de CO₂ ont triplé depuis 1965 et leur accroissement ne ralentit pas, au contraire. Les émissions anthropiques sont environ 2 fois plus importantes que l'accroissement de la masse de CO₂ dans l'atmosphère.

On peut observer la corrélation entre la quantité de CO₂ injectée dans l'atmosphère par les activités humaines (essentiellement combustion du charbon du pétrole et du gaz) et la quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère

CO2 masse dans l'atmosphère vs masse injectée

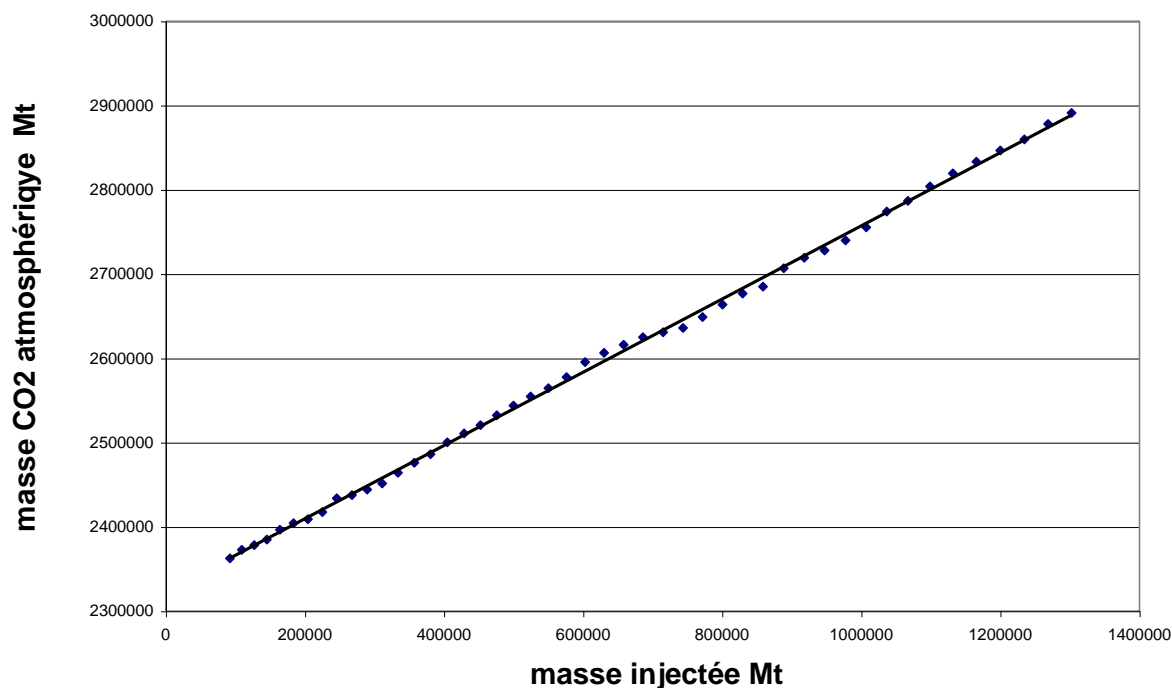


Figure 5

Corrélation entre la quantité de CO₂ émise par les activités humaines et le contenu en CO₂ de l'atmosphère terrestre.

La Figure 5 montre que, alors qu'environ 1300 milliards de tonnes ont été émises par les activités humaines depuis 1960, seulement 575 milliards sont restés dans l'atmosphère. La corrélation remarquable entre la quantité de CO₂ émise par les activités humaines et la masse totale de CO₂ dans l'atmosphère montre donc clairement que l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère est bien due aux émissions anthropiques. On peut donc conclure, en appliquant le critère du rasoir d'Ockam², que

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est d'origine anthropique

Part des émissions diluée dans l'atmosphère

En rapprochant la Figure 4 et la Figure 3 on obtient le pourcentage des émissions qui provoquent la croissance de la concentration de CO₂

² Le critère du rasoir d'Ockam consiste à choisir, entre deux théories ou explications possibles, la plus simple : « les hypothèses suffisantes les plus simples sont les plus vraisemblables ».

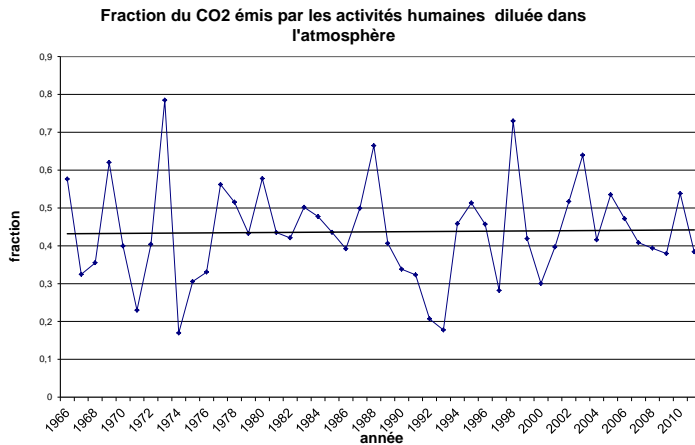


Figure 6

Evolution de la fraction de CO₂ émis contribuant à l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère

On remarque que la fraction de CO₂ émis réabsorbé (par l'océan et la biomasse) ne semble pas diminuer, ce qui est une bonne nouvelle. Une bonne nouvelle pour le réchauffement climatique, mais pas pour l'acidification de l'océan dont le pH reste supérieur à 7, mais atteint des valeurs telles que le calcaire s'y dissout avec des conséquences néfastes pour les animaux à coquille. La Figure 7 donne la quantité de CO₂ émis qui est réabsorbée. Elle atteint plus de 5 Gt C actuellement, mais ne dépassait pas 3 Gt C en 1965. En admettant, comme semble l'indiquer la Figure 6, que la fraction du CO₂ émis diluée dans l'atmosphère reste constante on voit qu'il ne semble pas exister de seuil en dessous duquel les émissions anthropiques ne contribueraient plus à l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Il est important de noter que, dans la phase actuelle, l'ensemble biomasse-océan reste un puits de CO₂ et non une source comme il a pu l'être dans les phases de réchauffement en sortie d'ère glaciaire. Le comportement de cet ensemble dépend de la compétition entre deux facteurs : la température dont la croissance tend à favoriser le dégazage du CO₂ par l'océan, et la pression partielle de CO₂ dont l'augmentation tend, au contraire, à favoriser la dissolution du CO₂ dans l'océan et son incorporation dans la biomasse en croissance. Pour toute température il existe une concentration d'équilibre du CO₂. L'importance du flux anthropique de CO₂ fait que l'équilibre est loin d'être atteint et que la **contribution de l'élévation de la température à l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère reste négligeable.**

masse réabsorbée

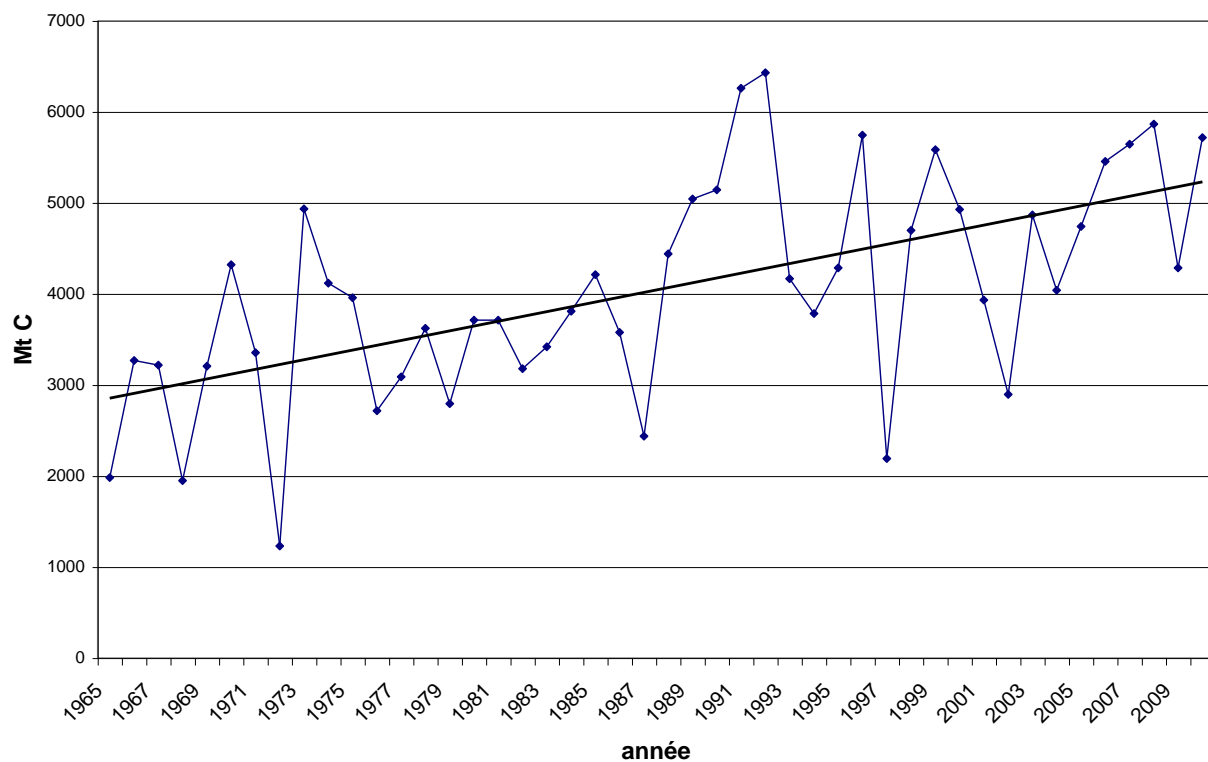


Figure 7

Variation annuelle de la quantité de CO₂ réabsorbé

Les émissions anthropiques de CO₂ comportent deux composantes : la principale, due à la combustion des combustibles fossiles et celle, plus modeste, due aux modifications d'usage des sols représentées ci-dessous

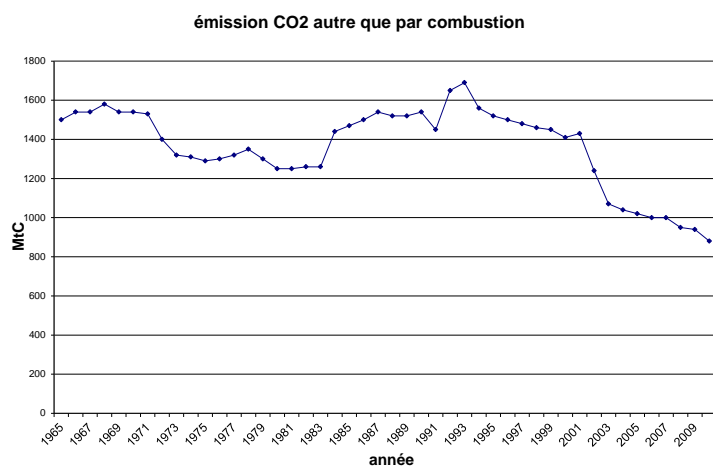


Figure 8

Evolution des émissions annuelles liées à la modification des affectations des sols

Evolution de la température globale

L'évolution relative de la température (différence par rapport à la moyenne 1951-1980) est donnée sur la Figure 9. La tendance à la hausse s'est révélée clairement à partir de 1974 et se poursuit depuis.

Evolution de la température globale

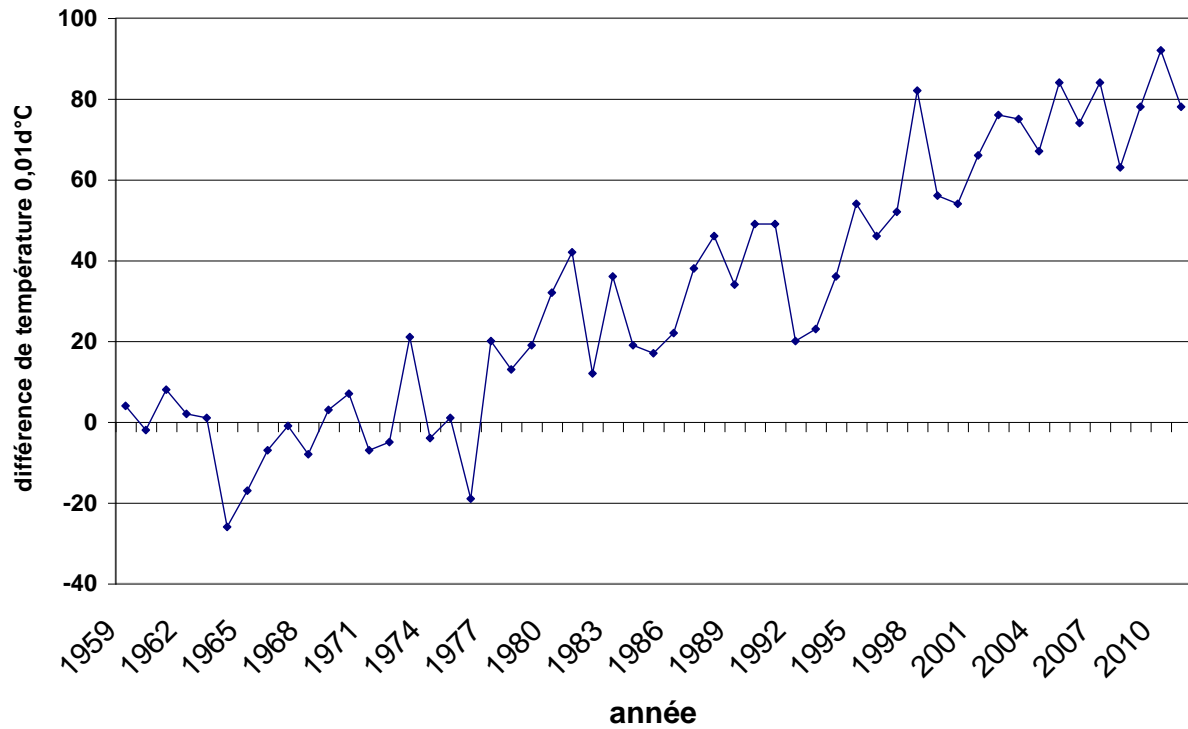


Figure 9

Evolution de la température moyenne annuelle globale

Corrélation entre la concentration en CO₂ et la température

A partir de leurs valeurs annuelles on peut établir le diagramme de corrélation entre températures moyennes globales et concentrations du CO₂ dans l'atmosphère.

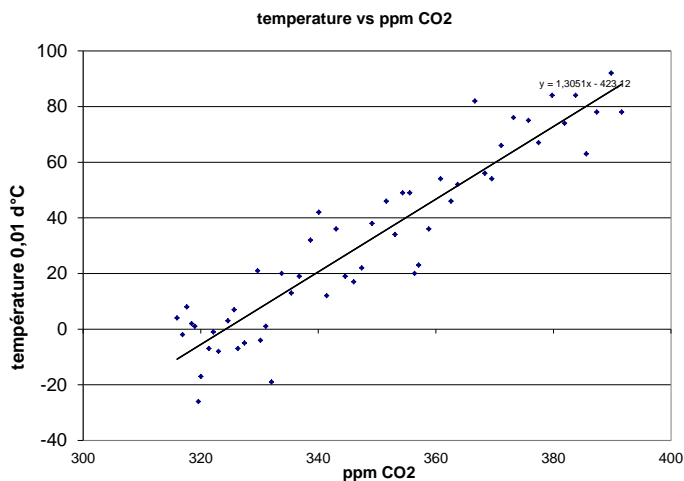


Figure 10

Corrélation entre l'augmentation de la température et la concentration de CO₂

Telle qu'elle apparaît sur la Figure 10, la forte corrélation entre les augmentations de la concentration en CO₂ et de la température est évidente. Les écarts observés par rapport à la corrélation moyenne trouvent essentiellement leur origine dans les fluctuations naturelles du climat se traduisant par des phénomènes physiques tels que les variations de l'irradiation solaire, les phénomènes El Nino, La Nina. Il est remarquable que ces phénomènes qui peuvent avoir des effets importants sur la climatologie d'une année donnée ne masquent en aucun cas le caractère structurant de la concentration en gaz carbonique. **Le facteur essentiel conduisant à l'augmentation de la température globale est donc l'augmentation de la concentration de CO₂** (et, éventuellement, de celle d'autres gaz à effet de serre dont la progression est parallèle à celle du CO₂). Corrélativement on peut conclure avec un haut degré de certitude que **l'augmentation de la température globale est d'origine anthropique³**. De plus, **le réchauffement climatique ne montre aucun signe de ralentissement.**

Le coefficient de corrélation entre concentration en CO₂ et température atteint 0,93.

Le caractère linéaire et fort de la corrélation est remarquable et permet de faire des extrapolations de manière relativement assurée. La croissance de la concentration de CO₂ a été de 70 ppm pendant les 30 dernières années. Une extrapolation sur les 90 années à venir se traduiraient donc par une croissance supplémentaire de 210 ppm. L'augmentation de

³ Une nouvelle application du rasoir d'Ockam

température extrapolée selon la Figure 10 atteindrait donc environ 3 degrés supplémentaires en 2100.

Si la température moyenne augmente régulièrement en fonction de la concentration de CO₂ il n'est pas évident que cette augmentation soit accompagnée d'une augmentation de la violence des phénomènes climatiques tels que cyclones, tempêtes etc. Ces phénomènes sont plutôt dominés par les différences de température entre mer et continent.

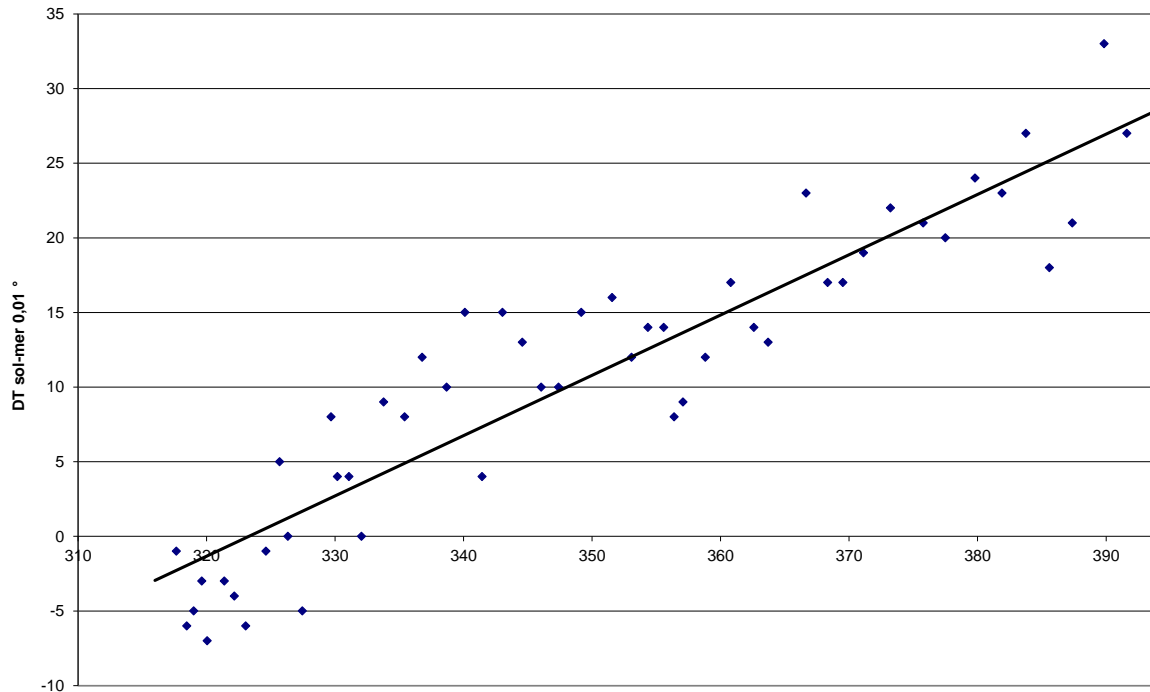
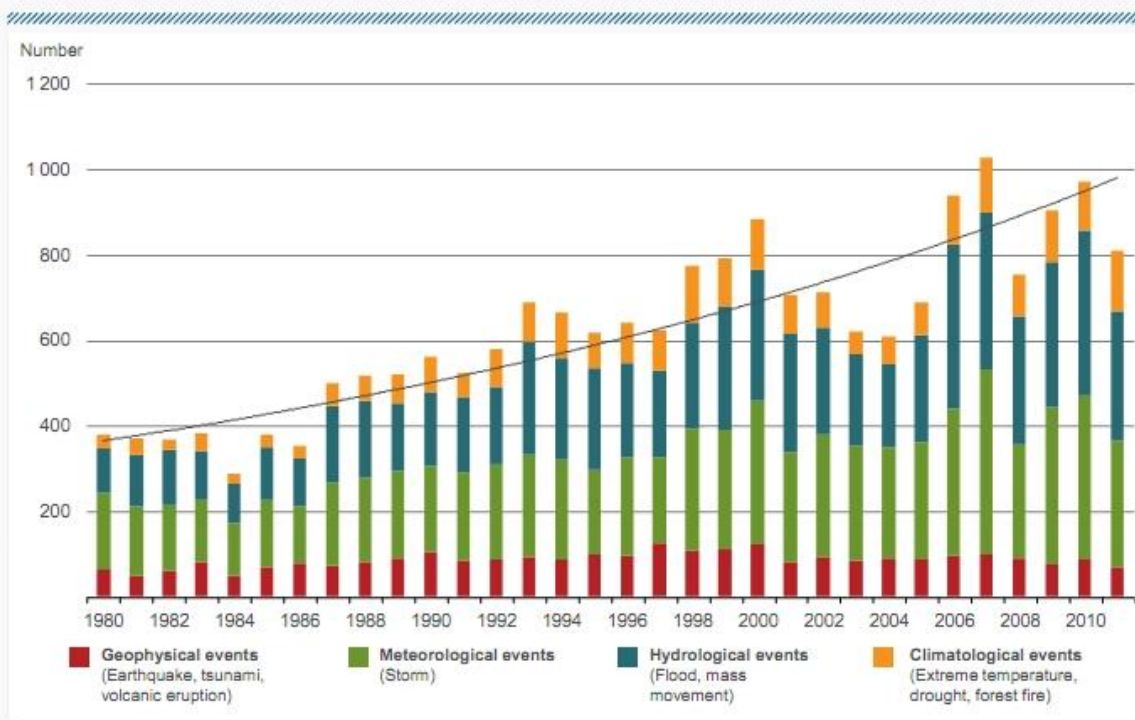


Figure 11

Evolution de la différence entre les températures moyennes de surface sur les terres émergées et sur la mer

Conséquences économiques du réchauffement climatique

On peut trouver l'évolution du nombre de sinistres sur le site du réassureur Munich Re

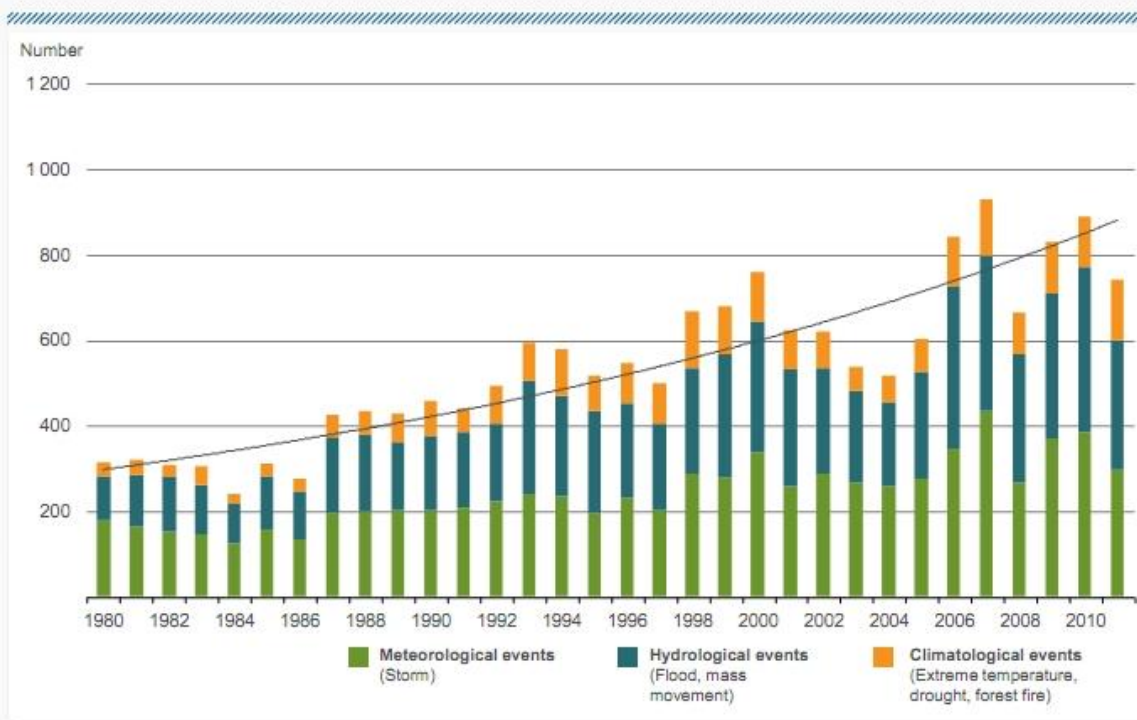


© 2012 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE – As at March 2012

Figure 12

nombre de catastrophes annuelles

Sur la Figure 12 on voit que le nombre de catastrophes géophysiques (tremblement de terre, tsunami) ne présente pas de tendance croissante marquée, au contraire des catastrophes de nature climatologique.



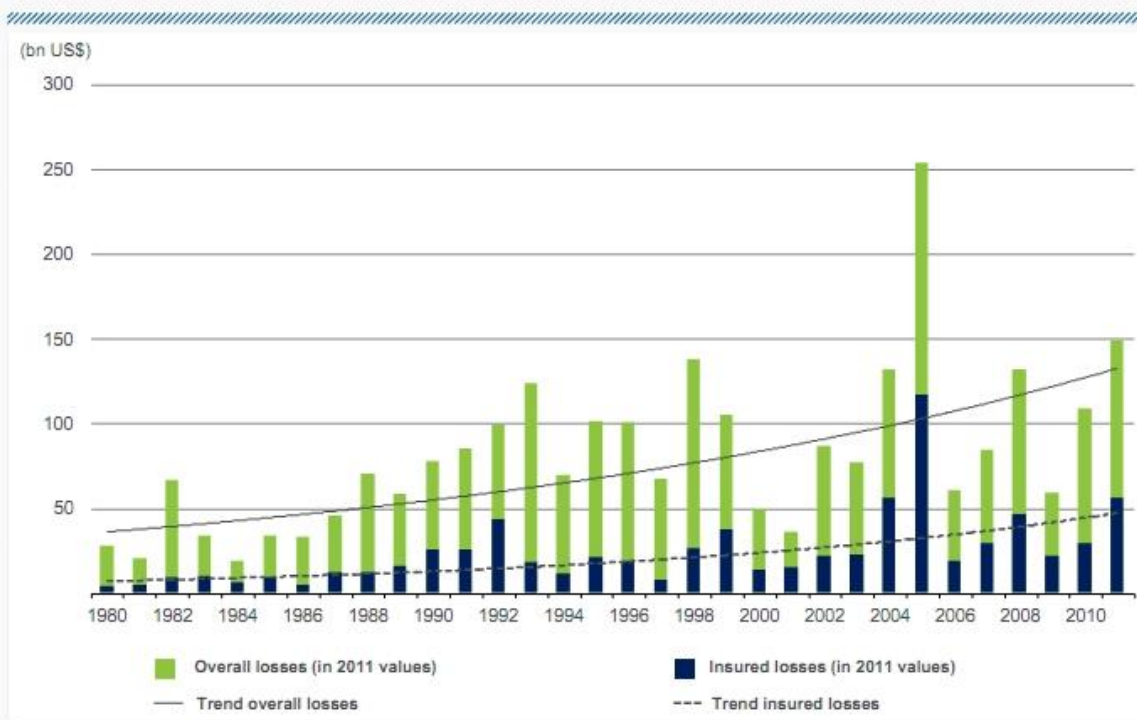
© 2012 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE – As at March 2012

Figure 13

Evolution du nombre annuel de catastrophes climatiques

La Figure 13 montre que cette dernière catégorie a vu son nombre multipliée par près de 3 en 30 ans.

En ce qui concerne les coûts ils croissent de façon plus irrégulière, comme on peut le voir sur la Figure 14, mais ils ont également été multipliés par 3 en 30 ans pour atteindre 150 milliards de dollars par an en tendance.



© 2012 Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCatSERVICE – As at March 2012

Figure 14

Evolution du coût des catastrophes naturelles dues aux facteurs climatiques

Sur la même période de temps le nombre de décès dus aux événements climatiques s'élève à 1,4 millions. Soit une moyenne d'environ 45000 par an

Les coûts peuvent être rapprochés des PIB à savoir :

- PIB mondial: 39000 G\$
- OCDE: 30000 G\$
- Afrique: 900 G\$

En extrapolant les résultats d'une croissance des coûts d'un facteur 3 tous les 30 ans, soit à un rythme annuel de 3%, on arriverait à un coût des catastrophes climatiques de 4000 milliards de dollars (2010) en 2100 et un nombre de décès annuels de plus d'un million.

Influence de l'activité solaire sur la température

On observe sur la Figure 6 des fluctuations de la température autour de la courbe de tendance. Ces écarts sont rapportés sur la Figure 15. Ils varient de + ou - 0,02 degrés. Il semble y avoir une composante périodique dans leur comportement qui pourrait avoir une période assez proche de la périodicité des tâches solaires

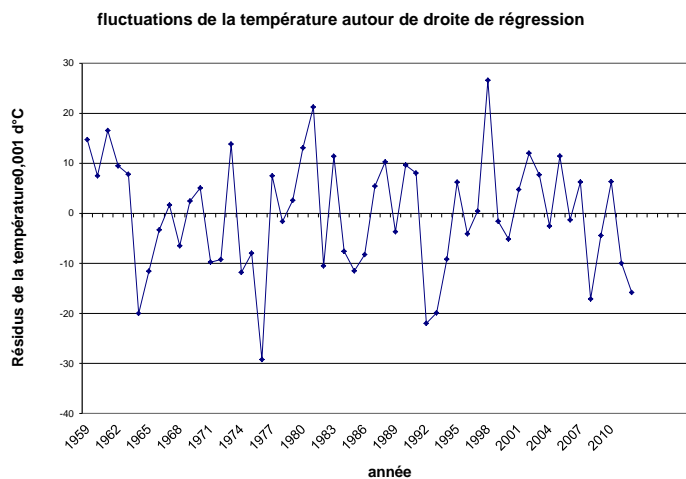


Figure 15

Comportement des écarts de la température à la droite de régression

On est ainsi amené à étudier l'influence de l'activité solaire sur la température. J'ai retenu comme indice de l'activité solaire le nombre de tâches observées. Pour obtenir cet indice annuel je me suis contenté d'utiliser la valeur moyenne annuelle du nombre de tâches observées chaque mois. Il est représenté sur la Figure 16

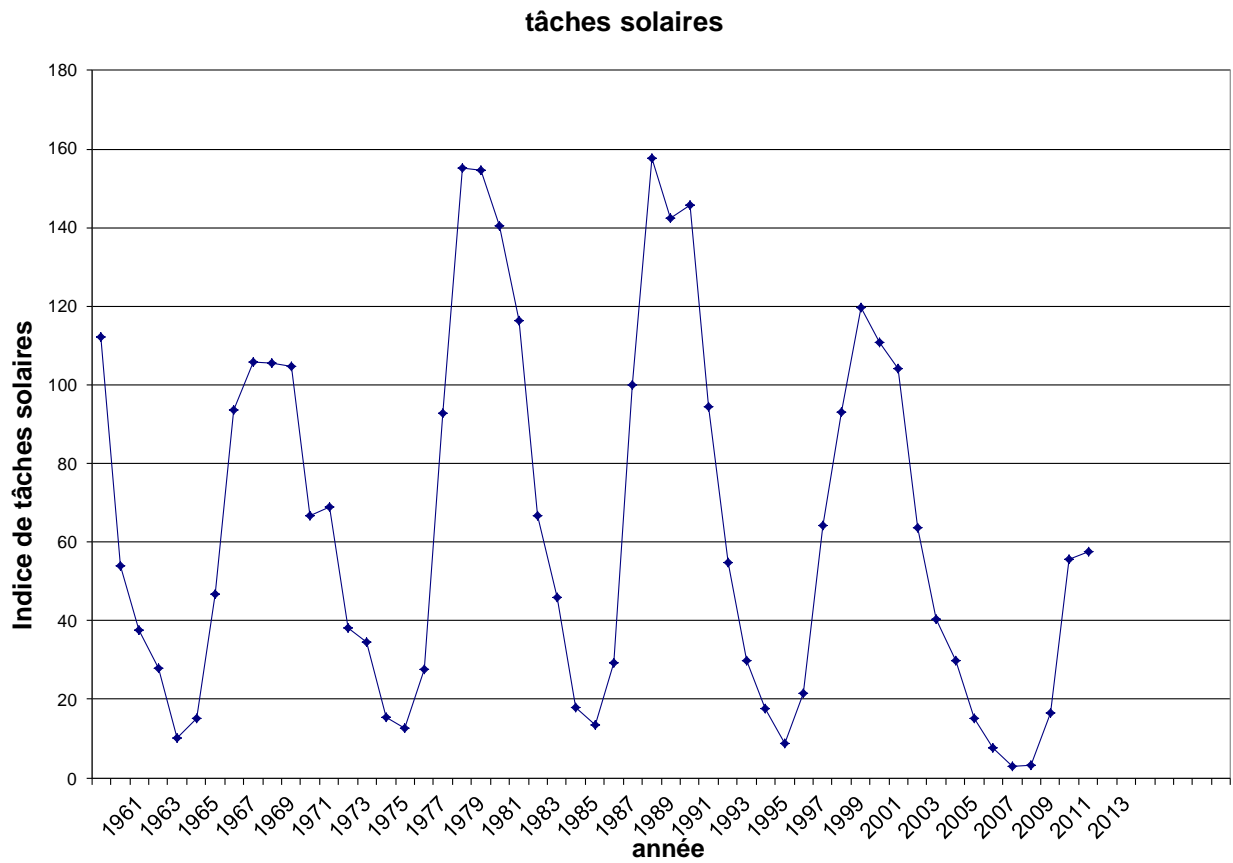


Figure 16

Evolution du nombre de tâches solaires

La corrélation entre la température et l'indice de l'activité solaire est représentée sur la Figure 17

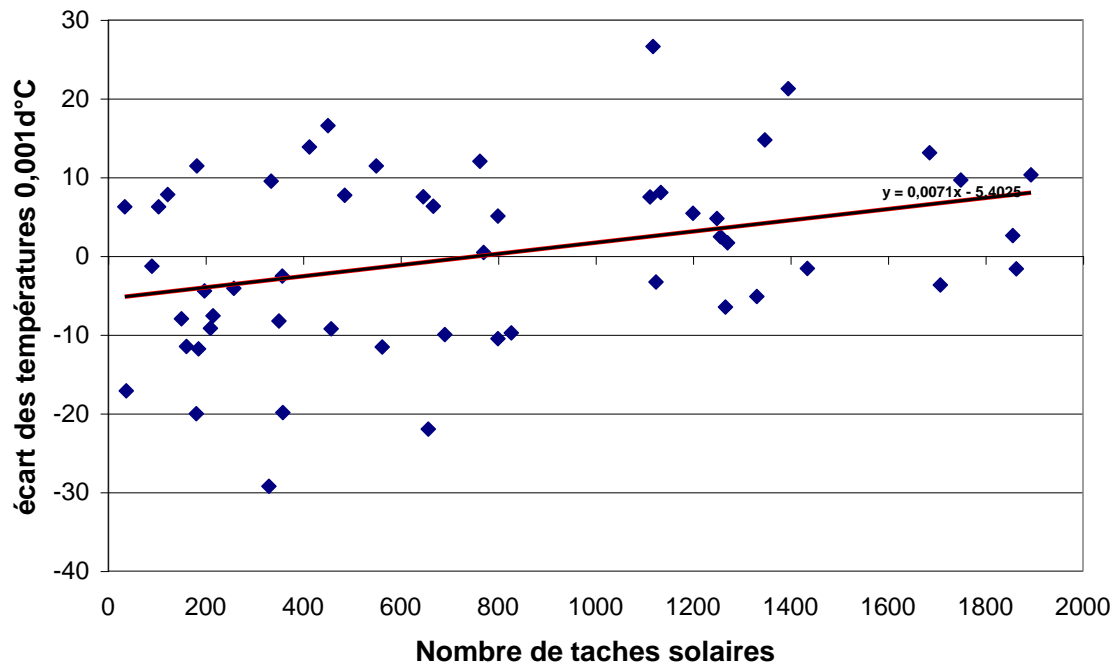


Figure 17

Corrélation entre l'indice d'activité solaire et la température résiduelle

On constate une certaine corrélation qui varie entre + et - 0,01 degrés, soit environ la moitié des fluctuations observées sur la Figure 15

Influence de l'oscillation australe (ENSO) El Nino-La Nina sur la température

Un autre facteur qui peut influencer sur les températures est l'oscillation El Nino La Nina. Les variations de l'indice d'activité sont indiquées sur la Figure 18.

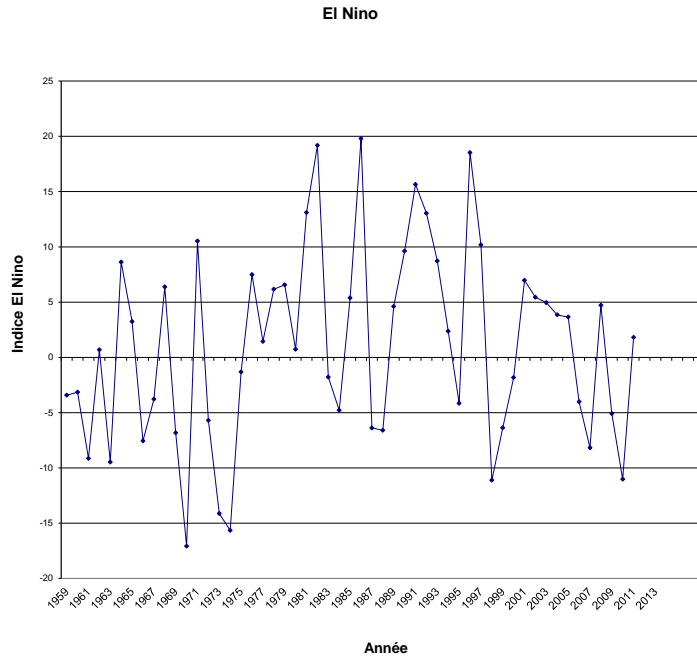


Figure 18
Variations de l'indice El Nino La Nina

La corrélation entre l'indice El Nino et la température résiduelle est illustrée sur la Figure 19

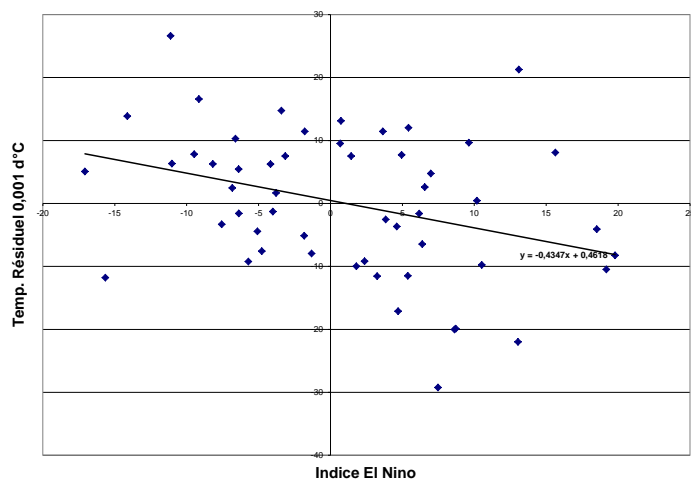


Figure 19

Corrélation entre l'indice El Nino La Nina et la température résiduelle.

On voit sur la figure que la corrélation négative atteint aussi entre + et - 0,01 degrés. L'écart quadratique moyen à la droite de régression entre température et concentration de CO₂ est estimée à 0,011 degrés, soit environ 10% de la variation de température depuis 1960. A partir des droites de régression de la Figure 17 et de la Figure 19 on peut calculer les variations annuelles de températures dues aux variations de l'irradiation solaire et aux oscillations El Nino-La Nina. On remarque que le pic de température observé en 1998 correspond à un très faible indice El Nino.

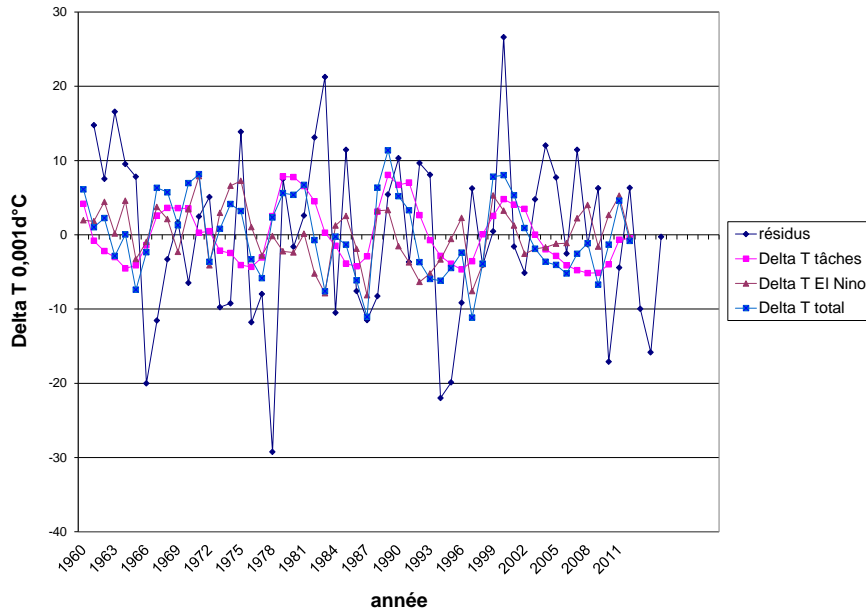


Figure 20

Variations annuelles des températures moyennes provoquées par les évolutions de l'irradiation solaire et les oscillations El Nino-La Nina. La somme de ces variations est également représentée ainsi que les fluctuations résiduelles (résidus) de la Figure 15

On constate que l'effet des variations de l'irradiation solaire et de l'oscillation Sud Pacifique est inférieure mais comparable aux fluctuations résiduelles des températures observées.

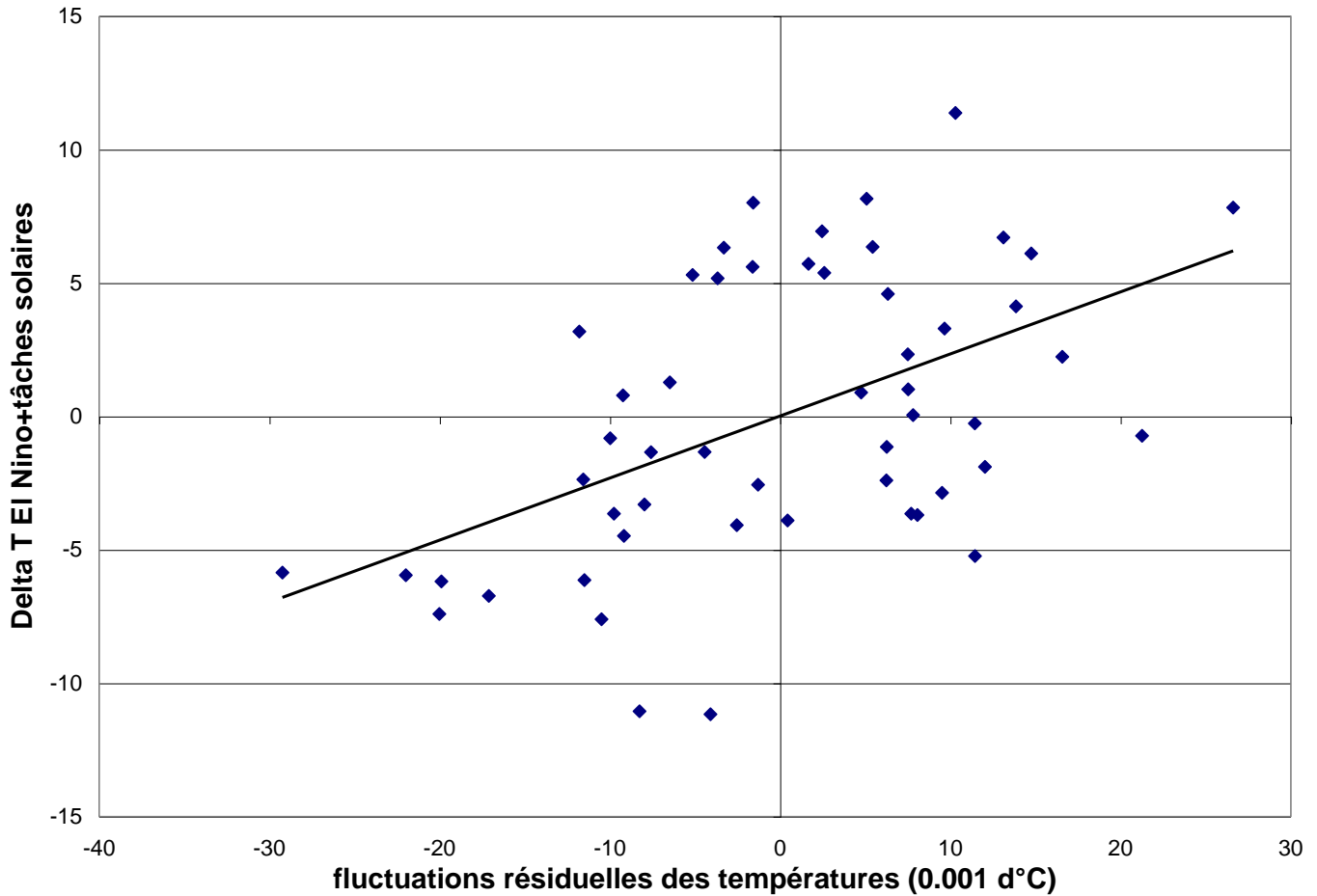


Figure 21

Corrélations entre les fluctuations résiduelles de température et les variations de température provoquées par les évolutions de l'irradiation solaire et l'oscillation Sud Pacifique

La Figure 21 montre que les effets parasites traités ici représentent environ 20% des fluctuations résiduelles de la température. L'essentiel des fluctuations observées sur l'évolution des températures provient probablement des fluctuations naturelles habituelles du climat d'une année sur l'autre. D'une façon générale, l'influence sur la température des variations de l'activité solaire et des oscillations El Nino La Nina est faible devant celle de l'augmentation de la concentration en CO₂.

Conclusion

De ce qui précède on peut conclure que les évolutions observées depuis 1960 démontrent l'existence du réchauffement climatique et son origine anthropique sans recours à des notions théoriques. Toutefois, ces évolutions sont parfaitement compatibles avec la théorie de l'effet de serre, ce qui permet de se reposer sur celle-ci pour prévoir les évolutions futures. La corrélation entre l'augmentation de température et celle de la concentration en CO₂ est très forte (coefficient de corrélation de 0,93) et remarquablement linéaire. L'évolution de la concentration de CO₂ est relativement facile à prévoir pour les différents scénarios d'émission en admettant que la moitié des émissions seulement se retrouve dans l'atmosphère. Aucun signe de saturation de l'augmentation de la température en fonction de la concentration de CO₂ n'est observé, ce qui permet de retenir qu'une augmentation de la concentration de CO₂

de 100 ppm entraîne une augmentation de la température de 1,3 degrés C. Nous sommes actuellement sur une trajectoire d'augmentation de 30 ppm en 10 ans. Il n'est donc pas besoin d'être grand clerc pour voir que si les tendances actuelles se maintiennent (en fait elles ont tendance à accélérer) on doit s'attendre à une augmentation de la température moyenne de 4 degrés en 2100. Nous avons vu que le nombre de catastrophes climatiques a été multipliés par 3 en 30 ans pour une augmentation de température de 0,6 degrés. Une extrapolation exponentielle en fonction de la température donne évidemment froid (ou chaud !) dans le dos puisqu'elle conduit à un nombre de catastrophes annuelles 250 fois plus importante qu'à présent ! Même une simple extrapolation linéaire n'est guère rassurante. Le nombre de décès annuels dus aux catastrophes climatiques dépasserait largement le million.