

Un forum débat ayant pour thème « **Réchauffement climatique et maladies tropicales : que craindre pour demain ?** » a eu lieu le 8 septembre 2007 en clôture des XIII<sup>e</sup> Actualités du Pharo.

## LE CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL

M. PETIT

*Climatologue, membre de l'Académie des sciences, Président de la Société météorologique de France, membre du GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat)*

*Med Trop 2007 ; 67 : 458-464*

### QU'EST-CE QUI DÉTERMINE LA TEMPÉRATURE DE LA TERRE ?

#### L'échange d'énergie par rayonnement

- *Le rayonnement solaire*

Le soleil rayonne une lumière visible qui nous éclaire le jour. On peut aisément se convaincre que ce rayonnement transporte également de la chaleur : il suffit d'être à l'ombre, c'est-à-dire de cacher le soleil par un objet quelconque, tel qu'un arbre ou un parasol, pour avoir moins chaud. Cette impression subjective peut être confirmée par l'expérience simple qui consiste à déplacer un thermomètre du plein soleil à l'ombre.

- *Le rayonnement infrarouge*

Si on regarde un charbon de bois dans un barbecue et qu'on souffle dessus énergiquement, il rayonne de la lumière comme le soleil et si on approche sa main, on sent une chaleur du côté qu'on présente au foyer, mais rien sur le côté opposé. C'est là le même phénomène que celui que nous éprouvons avec le soleil : il faut retourner la viande pour la faire cuire au barbecue, comme il faut se retourner sur la plage pour bronzer sur tout le corps. Si on cesse de ventiler énergiquement le charbon de bois, la combustion est moins violente, sa température diminue et il prend une couleur rouge de plus en plus sombre jusqu'à ne plus être visible sans éclairage extérieur. Cependant, si on approche sa main, on ressent toujours une impression de chaleur, pouvant aller jusqu'à la brûlure si on l'approche trop près. Ce rayonnement succédant au rouge sombre est appelé infrarouge : il transporte de l'énergie comme le rayonnement lumineux, mais nos yeux ne le voient pas.

#### La température de la Terre

La Terre absorbe une partie de l'énergie du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Sa température a donc tendance à augmenter jusqu'à ce qu'elle parvienne à évacuer une quantité d'énergie équivalente à celle qu'elle absorbe. La Terre est isolée dans le vide interplanétaire et la seule manière dont elle puisse perdre de l'énergie est de rayonner dans l'espace, comme le fait le soleil, à ceci près que ce rayonnement est

infrarouge et donc non visible. Sa température d'équilibre s'établit donc à une valeur qui lui permette d'émettre dans l'infrarouge une énergie égale à l'énergie solaire qu'elle absorbe.

#### Qu'est-ce que l'effet de serre ?

Avant d'aller se perdre dans l'espace, le rayonnement infrarouge de la Terre traverse son atmosphère qui, en fonction de sa composition, en absorbe une partie. C'est pour cela que l'atmosphère joue un rôle important dans la détermination de la température de la planète, comme Joseph Fourier l'avait déjà souligné en 1826. Si on ajoute dans l'atmosphère des gaz qui ont tendance à absorber le rayonnement infrarouge, le rayonnement sortant diminue et la Terre perd moins d'énergie. Sa température augmente puisqu'elle perd moins d'énergie qu'elle n'en reçoit. Un nouvel équilibre sera atteint lorsque l'augmentation de température provoquera un rayonnement plus intense compensant l'absorption induite par le changement de composition de l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre, car il se produit dans les serres de jardinier ou d'horticulteur.

#### L'effet de serre provoqué par les activités humaines.

Le climat de la terre évolue sous l'influence de causes naturelles qui ont toujours existé et continueront à jouer un rôle.

- Tout d'abord, la Terre ne tourne pas toujours de la même façon autour du Soleil, à cause de l'attraction des autres planètes et de la Lune : l'axe de rotation autour duquel la planète tourne sur elle-même en un jour est plus ou moins incliné par rapport au plan dans lequel elle accomplit sa rotation annuelle autour du soleil, l'aplatissement de l'ellipse qu'elle décrit dans ce plan est plus ou moins marqué, le mois au cours duquel la Terre est au plus près du Soleil varie régulièrement. Toutes ces variations se produisent lentement, avec des périodes qui se mesurent en dizaines de milliers d'années. Elles provoquent des changements dans la manière dont le Soleil éclaire notre planète de l'angle et sont à l'origine des grands cycles glaciaires interglaciaires qui ont une amplitude de l'ordre de 6°C et une période de 100 000 ans. Nous

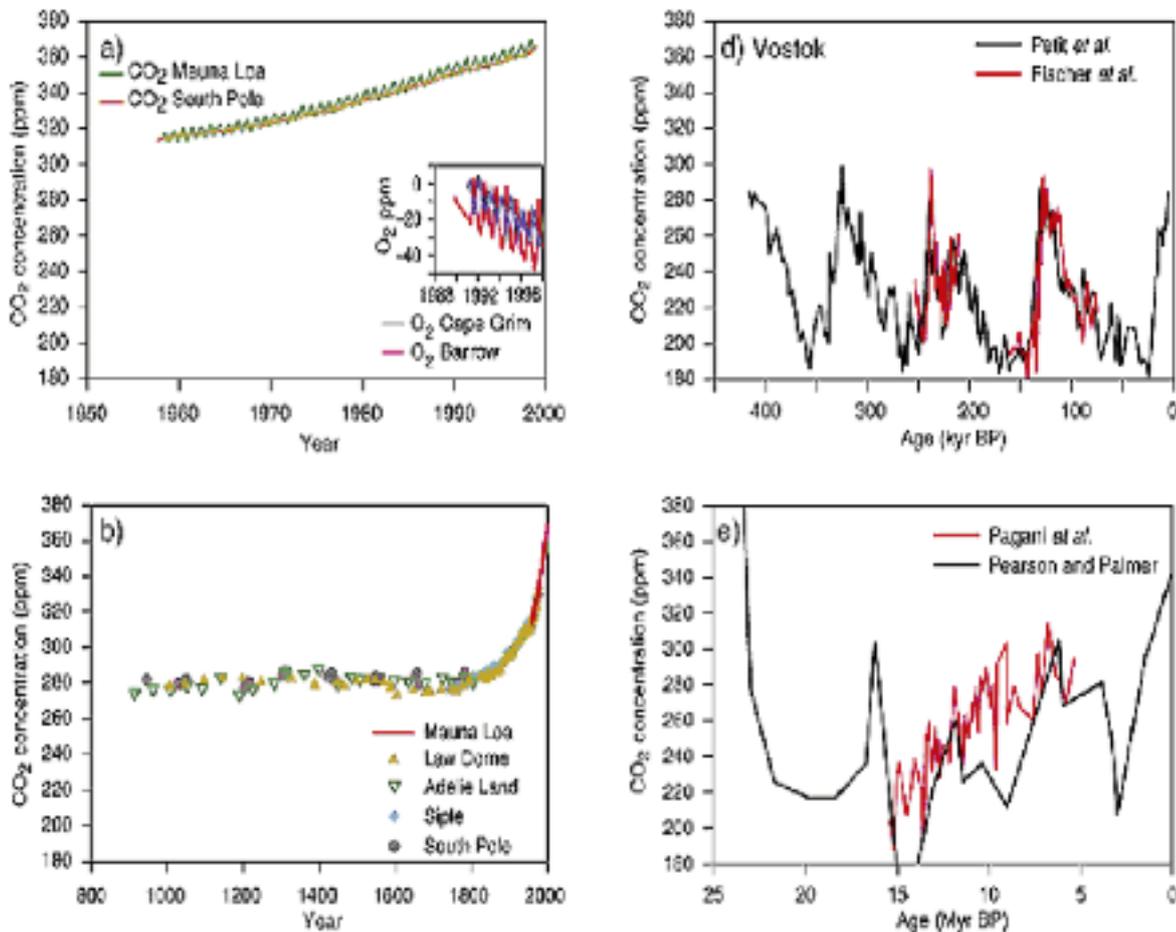


Figure 1 - Evolution de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique à diverses échelles de temps. (L'échelle horizontale est graduée en date pour les figures de gauche, en milliers d'années avant le temps présent pour la figure en haut à droite et en millions d'années avant le temps présent pour la figure en bas à droite).

sommes depuis 10 000 ans dans une période interglaciaire, donc chaude.

- Le soleil connaît lui-même une variabilité qui se manifeste en particulier par la présence de taches sur le soleil dont le nombre varie avec un cycle de 11 ans. Toutefois, ce cycle affecte le rayonnement solaire essentiellement dans la gamme de l'ultraviolet et se retrouve donc dans le comportement des parties les plus élevées de l'atmosphère terrestre qui l'absorbe : ionosphère (altitude de 100 km et au-delà) et, dans une moindre mesure, stratosphère (altitude d'environ 30 km, voir fiche ozone). Il n'affecte que peu l'énergie totale rayonnée et son influence est détectée, mais très faible dans les phénomènes climatiques. Des variations à long terme du rayonnement total, comme un accroissement depuis le minimum, dit de Maunder, observé à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle dans le nombre de taches solaires, sont possibles, mais d'amplitude limitée et ne saurait expliquer les variations du climat, au cours des dernières décennies.

- Un autre paramètre jouant un rôle sur la température au sol est l'activité volcanique. Lors des fortes éruptions volcaniques, des poussières atteignent la stratosphère (au-des-

sus de 15 km) et peuvent y rester pendant une ou deux années avant de retomber vers le sol. Ces particules constituées essentiellement d'oxydes de soufre jouent un rôle d'écran pour le flux solaire incident, ce qui a pour effet de refroidir la surface. Lors de la dernière grande éruption du mont Pinatubo en 1991, un tel refroidissement de 0,5°C a été observé sur une grande partie de la planète. Mais ces effets sont de courte durée (1 à 2 ans). Ils représentent seulement une source de variabilité, mais ne peuvent expliquer la montée des températures que l'on observe de façon quasi continue au cours des 30 dernières années.

Les activités humaines ont, depuis le début de l'ère industrielle, ajouté à ces causes naturelles de nouvelles causes de variation liées au changement de la composition de l'atmosphère qu'elles induisent.

### Le changement de la composition de l'atmosphère

L'observation systématique de l'atmosphère montre de façon incontestable une augmentation de sa teneur en gaz à effet de serre. C'est ainsi que le nombre de molécules de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) qu'on trouve dans un million de molécules

d'air est passé de 280 en 1850, avant le début de l'ère industrielle à plus de 380 aujourd'hui. On dit 280 ou 380 ppm, ppm étant l'abréviation de parties par million. La composition de l'atmosphère est observée directement depuis 1958 avec précision. Le panneau en haut à gauche de la figure 1 montre cette évolution. On y voit de plus apparaître une oscillation annuelle liée au cycle de la végétation dans l'hémisphère nord où se trouve l'essentiel des terres continentales. Pour remonter plus loin dans le temps, on dispose de diverses méthodes. La plus puissante d'entre elles consiste à forer les calottes de glace antarctiques pour en extraire des carottes contenant des bulles d'air emprisonné il y a bien longtemps, lorsque les flocons de neige se sont transformés en glace sous le poids des nouvelles chutes de neige. Des forages profonds de 3 km permettent ainsi d'observer un air vieux de centaines de milliers d'années (panneau en haut à droite de la figure 1, où on voit clairement la traduction des grands cycles glaciaires sur la composition atmosphérique). Des considérations géochimiques permettent d'avoir des estimations encore plus anciennes représentées sur le panneau en bas à droite. On voit qu'il faut remonter dans le temps de plusieurs dizaines de millions d'années pour retrouver des concentrations supérieures aux concentrations actuelles.

L'augmentation annuelle de la concentration ne représente à peu près que la moitié de ce qu'elle serait si l'atmosphère avait retenu la totalité du gaz carbonique que l'humanité a produit en brûlant du charbon, du pétrole et

du gaz naturel (Fig. 2). L'autre moitié du gaz carbonique produit est absorbée par l'océan et la biosphère. Il est donc vraisemblable que l'utilisation des combustibles fossiles soit responsable du changement de composition atmosphérique observé. Cela est confirmé par la diminution observée de la concentration d'oxygène présentée dans le premier panneau de la figure 1, l'oxygène nécessaire à la fabrication du CO<sub>2</sub> additionnel ayant été prélevé dans l'atmosphère. Enfin, des mesures de composition isotopique du carbone atmosphérique viennent compléter le faisceau d'arguments qui permettent d'attribuer de façon certaine le changement de la composition atmosphérique aux activités humaines.

Le gaz carbonique n'est pas le seul gaz à effet de serre dont la concentration ait augmenté. Celle du méthane a cru de 120% et celle du protoxyde d'azote de 20%. D'autres gaz ont été introduits par les activités humaines, comme les CFC responsables par ailleurs de la destruction de la couche d'ozone (voir fiches sur l'air et sur l'ozone).

### Le changement climatique observé

Une telle augmentation de la teneur en gaz à effet de serre se traduit, comme l'avait prévu Svante Arrhénius en 1896 et comme le simulent les modélisations numériques modernes, par un effet de serre additionnel entraînant une augmentation de la température moyenne du globe estimée

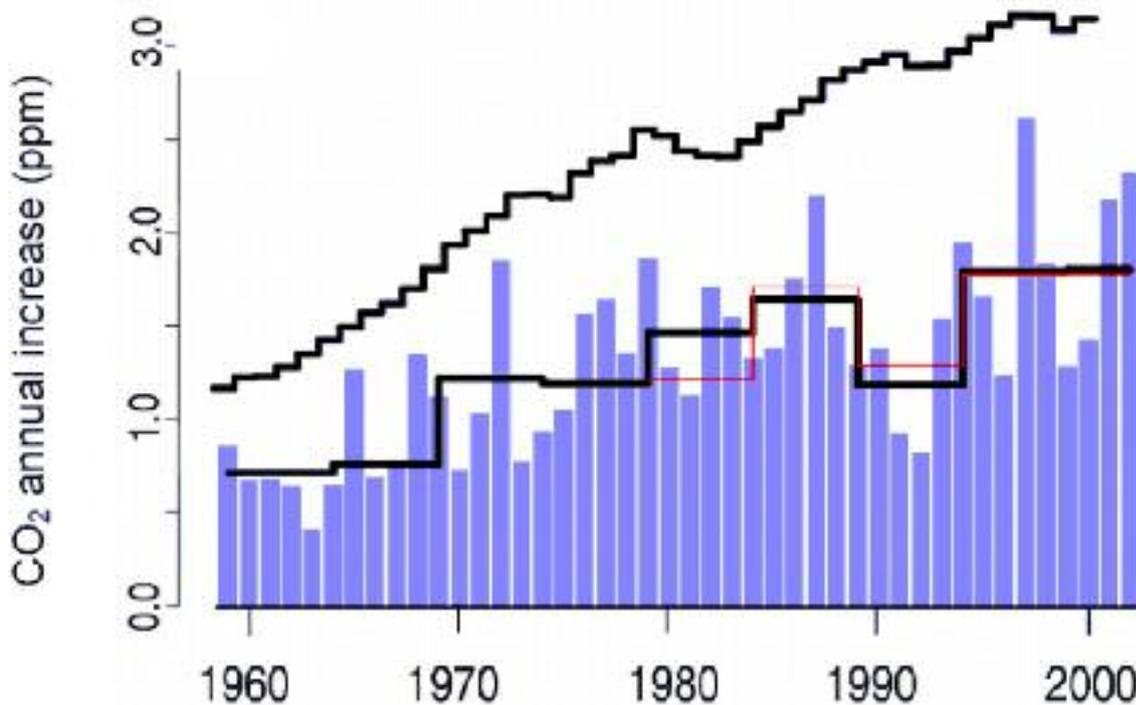


Figure 2 - Utilisation des combustibles fossiles et augmentation du gaz carbonique présent dans l'atmosphère, de 1959 à 2002. La courbe noire supérieure en marches d'escalier indique l'accroissement de la concentration du gaz carbonique atmosphérique qui aurait eu lieu si la totalité du gaz carbonique résultant de la combustion des combustibles fossiles était restée dans l'atmosphère où elle a été relâchée. Les colonnes bleues verticales indiquent l'augmentation annuelle effectivement observée de cette concentration. La moyenne sur 5 ans est fournie par les courbes noire et rouge qui traduisent les incertitudes sur cette moyenne.

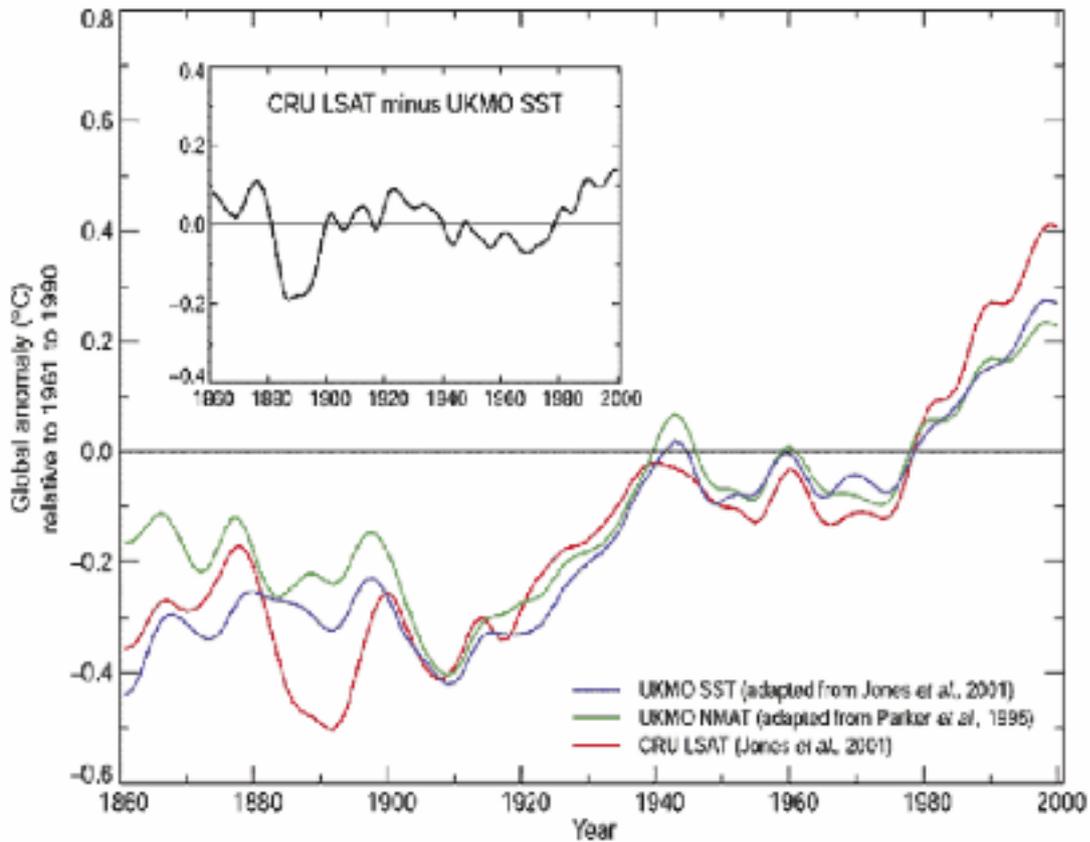


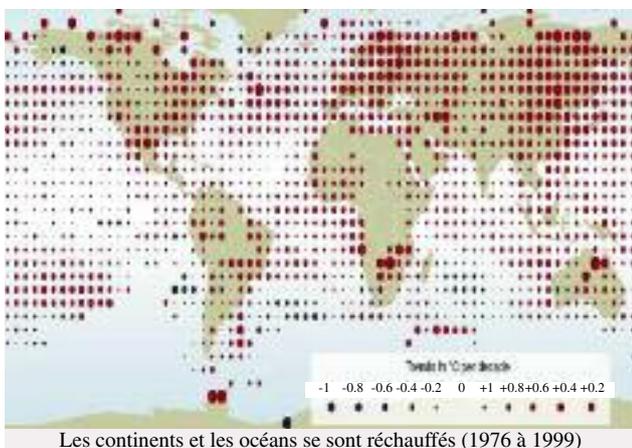
Figure 3 - L'évolution semblable au cours du temps de la température des terres, de la surface de l'eau de mer et de l'air à la surface de la mer.

à 0,8°C (à plus ou moins 0,2°C près). Les 12 dernières années sont les années les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1850, à une exception près en 1996.

Ce réchauffement n'est pas uniformément réparti, les océans dont l'effet régulateur sur les températures est bien connu se réchauffant naturellement moins que les continents, comme le montre la figure 4. On y observe en outre que l'accroissement de la température est particulièrement fort dans

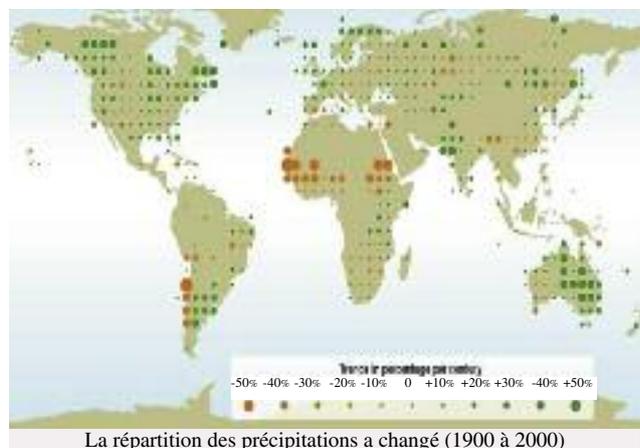
les régions les plus septentrionales d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Ce résultat, qui peut paraître surprenant, est dû au fait que la turbulence de l'atmosphère diminue quand la latitude croît et que la fonte de la glace et de la neige diminue la part de l'énergie solaire réfléchie vers l'espace.

Les précipitations sont également affectées par ce changement climatique, certaines régions étant plus arrosées et d'autres moins.



Les continents et les océans se sont réchauffés (1976 à 1999)

Figure 4 - Le diamètre des points traduit la variation en degrés de la température.



La répartition des précipitations a changé (1900 à 2000)

Figure 5 - Le diamètre des points traduit l'augmentation en % des précipitations.

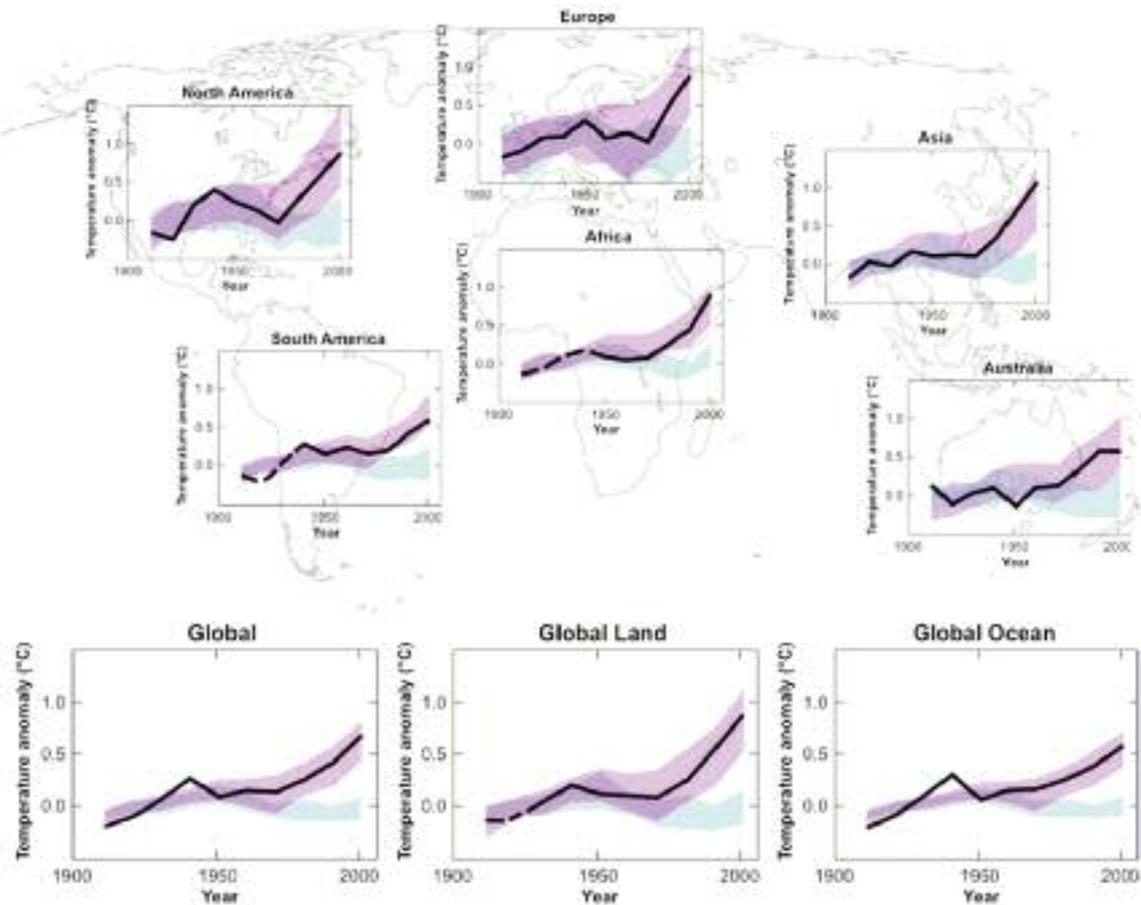


Figure 6 - Changements de la température de l'air à la surface de la Terre, à l'échelle mondiale et continentale de 1906 à 2005, par rapport à sa valeur moyenne pour la période 1901-1950, comparés avec les simulations des modèles numériques. Les lignes noires indiquent les changements observés et sont pointillées lorsque les données disponibles couvrent moins de 50% de la surface concernée. Les bandes bleues correspondent à des simulations ne prenant en compte que les phénomènes naturels et les bandes rouges à des simulations prenant en compte à la fois l'effet des phénomènes naturels et celui des phénomènes résultant des activités humaines. Les trois panneaux du bas correspondent de gauche à droite à la moyenne mondiale, à la moyenne des terres émergées et à la moyenne des océans.

### La cause du changement climatique observé

Les modèles simulant sur ordinateur la circulation des masses d'air dans l'atmosphère et des masses d'eau dans l'océan constituent la base des prévisions météorologiques actuelles. Ils peuvent être adaptés au calcul du changement du climat provoqué par une évolution donnée de la composition atmosphérique. On peut ainsi vérifier que les observations ne peuvent être expliquées que par la prise en compte de l'effet de serre dû au changement observé de la composition de l'atmosphère, lui-même provoqué par les activités humaines (Fig. 6).

## LE CHANGEMENT CLIMATIQUE AU COURS DU XXI<sup>e</sup> SIÈCLE

### L'évolution de la composition de l'atmosphère

Les besoins énergétiques de l'humanité ne cessent de croître tant à cause de la croissance de la population mondiale que du développement économique de certains pays.

Cette énergie est produite actuellement pour 80 % à partir de combustibles fossiles (Fig. 7).

**10 milliards de tonnes par an  
en « équivalent pétrole »**

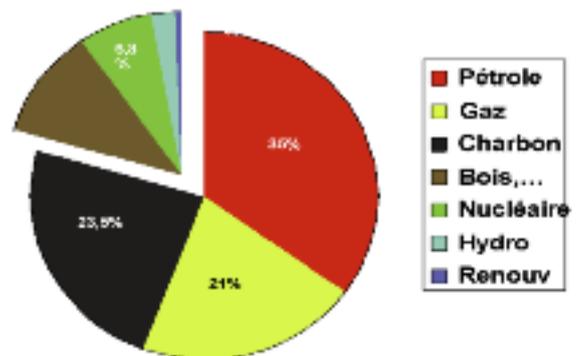


Figure 7 - Origine de l'énergie consommée mondialement par an.

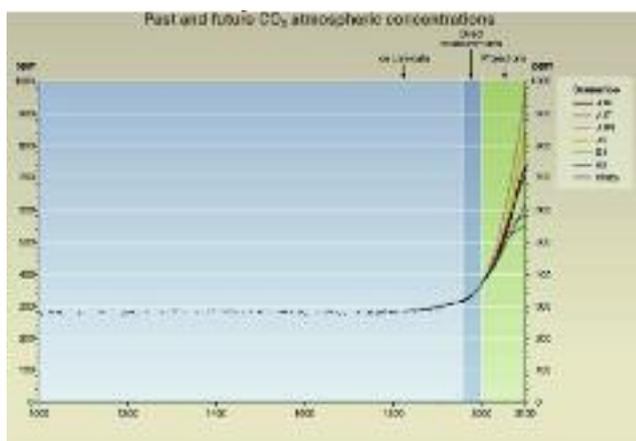


Figure 8 - Scénarios d'évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère, en l'absence de toute action volontariste pour réduire les émissions.

En l'absence d'actions volontaristes, les émissions de gaz carbonique croîtront dans les prochaines décennies et il s'en suivra une augmentation de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. Divers scénarios vraisemblables ont été construits pour de telles évolutions non-interventionnistes et ils conduisent à des concentrations allant de 550 à 1000 ppm (Fig. 8).

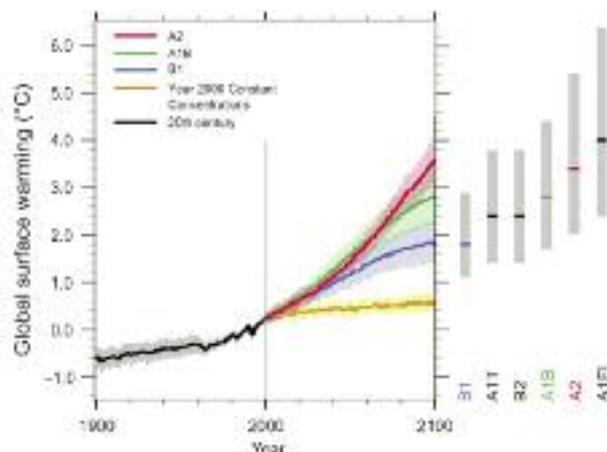


Figure 9 - Augmentation de la température moyenne de surface par rapport à la période 1980-99. Les courbes colorées montrent, en continuité avec les simulations relatives au XX<sup>e</sup> siècle les variations pour les scénarios A2, A1B and B1, ainsi que pour un scénario irréaliste où les concentrations seraient restées constantes à leur valeur de 2000 et qui présente l'intérêt de montrer le réchauffement auquel nous condamnons les émissions passées. Les zones colorées donnent une indication de la dispersion des simulations. Dans les barres de droite, le trait horizontal indique la valeur la plus probable pour le scénario d'émissions considéré et l'étendue des barres indique la gamme des valeurs vraisemblables.

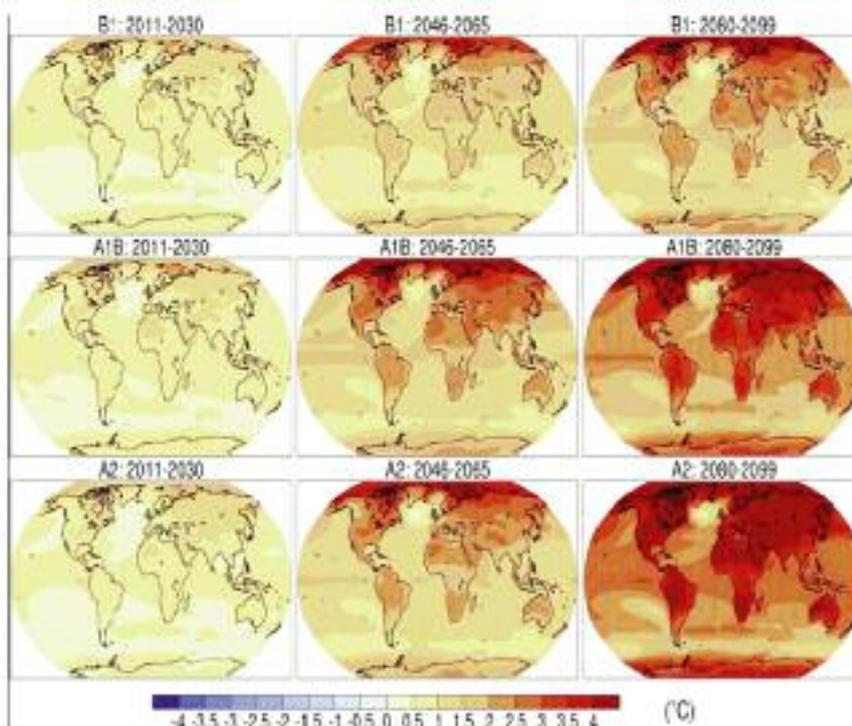


Figure 10 - Répartition mondiale de l'augmentation de température pour 3 scénarios (en lignes) et trois périodes (en colonnes).

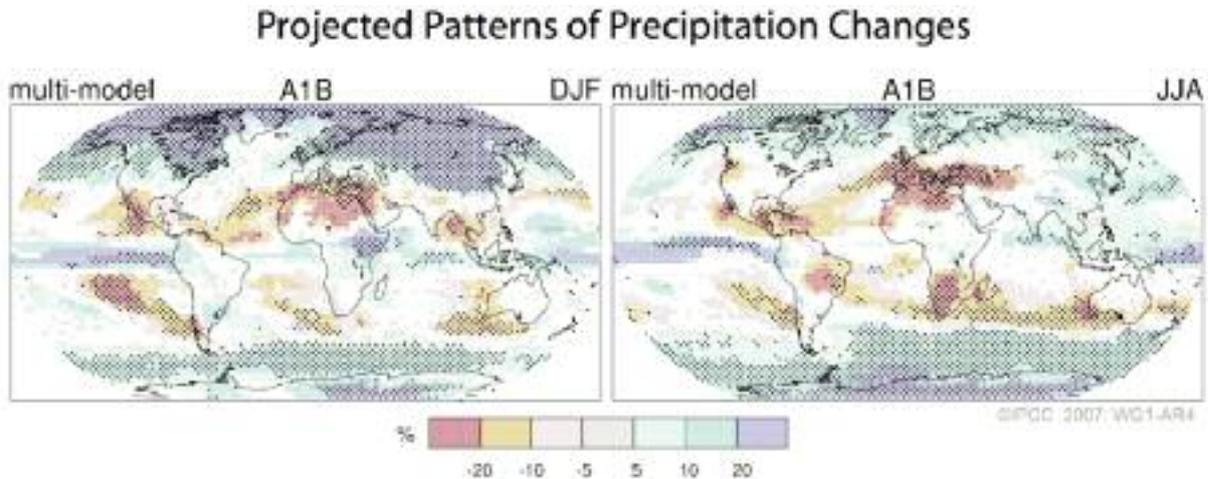


Figure 11 - Changements des précipitations en pourcentage pour la période 2090-2099, par rapport à 1980-1999. Ces valeurs correspondent à la moyenne des modélisations pour le scénario moyen d'émissions A1B pour les mois de décembre à février (à gauche) aux mois de juin à août (à droite). Les zones blanches sont celles où moins des deux tiers des modèles donnent un changement de même signe et les zones pointillées sont celles où plus de 90% des modèles donnent des changements de même signe.

### L'augmentation de la température moyenne mondiale

Les modèles numériques permettent de calculer l'évolution de la température moyenne mondiale correspondant à chaque scénario. Cependant, les modèles ne sont pas parfaits, ils sont en particulier incapables de simuler en des temps de calcul raisonnables des phénomènes de taille inférieure à 300 km. Il en résulte que les températures prévues sont entachées d'une incertitude. Les barres à droite de la figure 9 sont relatives à la température prévue en 2100. On voit que si on associe la concentration la plus faible à la partie basse de la barre correspondante, l'augmentation de température prévue est de 1°C et que si, à l'opposé, on associe la concentration la plus forte à l'extrémité haute de la barre, on trouve 6,4°C. C'est donc dans cette fourchette qu'on peut s'attendre à trouver l'augmentation de la température moyenne mondiale à la fin du siècle, en l'absence d'actions volontaristes. Les conséquences de telles variations de la température moyenne mondiale sont importantes puisque l'écart de 5°C qui existe entre une ère glaciaire et un optimum interglaciaire, c'est-à-

dire entre les périodes les plus froides et les périodes les plus chaudes des grands cycles climatiques naturels (la figure 1, panneau en haut à gauche en montre l'effet sur la composition de l'atmosphère), a entraîné un bouleversement de la géographie du monde.

### La répartition géographique du réchauffement

L'augmentation de température prévue n'est pas uniforme, les continents se réchauffant plus que les océans et les parties septentrionales subissant le réchauffement le plus fort (Fig. 10)

### Le changement des précipitations

La moyenne mondiale des précipitations devrait croître. La figure 11 montre que certaines régions comme le nord de l'Europe seront plus arrosées tandis que le Bassin méditerranéen sera confronté à une sécheresse accrue. On observera davantage de phénomènes pluvieux intenses, même dans les régions plus sèches.

La revue Médecine Tropicale en ligne  
[www.actu-pharo.com](http://www.actu-pharo.com)