

# Equilibres et variations climatiques

---

**Katia LAVAL**

Pour aborder le problème des fluctuations climatiques, il convient de rappeler d'abord les mécanismes qui interviennent dans l'équilibre climatique. On pourra ensuite parler de la variation du climat due à l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

## *I - Equilibre climatique*

Rappelons tout d'abord quelques propriétés de l'équilibre climatique.

### *1. Equilibre radiatif*

La planète Terre reçoit un rayonnement solaire qui en moyenne est de 345 W/m<sup>2</sup>.

Cette énergie est réfléchiée et diffusée en partie et le système absorbe 240 W/m<sup>2</sup>.

L'ordre de grandeur de l'énergie reçue sur la France est de 10<sup>14</sup>W.

Cet apport d'énergie correspond à un chauffage permanent et le système reste en équilibre car la Terre émet un rayonnement. Ce rayonnement est appelé souvent refroidissement radiatif ou rayonnement de grandes longueurs d'ondes (par opposition au rayonnement solaire de courtes longueurs d'ondes). Ce rayonnement de grandes longueurs d'ondes dépend de la température de la Terre et des constituants de l'atmosphère. En effet, les molécules triatomiques contenues dans l'atmosphère (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>

et O<sub>3</sub>) absorbent et émettent le rayonnement dans ce domaine de longueur d'onde et vont jouer un rôle dans l'équilibre thermique du système. La température globale sur la surface de la Terre est en moyenne de 15°C. Elle serait de -18°C s'il n'intervenaient pas les constituants atmosphériques que sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone.

## 2. Equilibre thermique

La **figure 1** représente l'équilibre thermique du système au sommet de l'atmosphère, à la surface de la Terre et dans l'atmosphère (les grandeurs sont exprimées en pourcent du rayonnement solaire). On remarque au sommet de l'atmosphère l'équilibre radiatif entre les rayonnements des 2 domaines de longueur d'onde. On peut noter l'importance des nuages et des glaces qui sont essentiels pour déterminer le rayonnement solaire réfléchi. On peut noter l'importance de la température et des constituants H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> qui déterminent l'émission thermique. L'ozone absorbe aussi le rayonnement solaire.

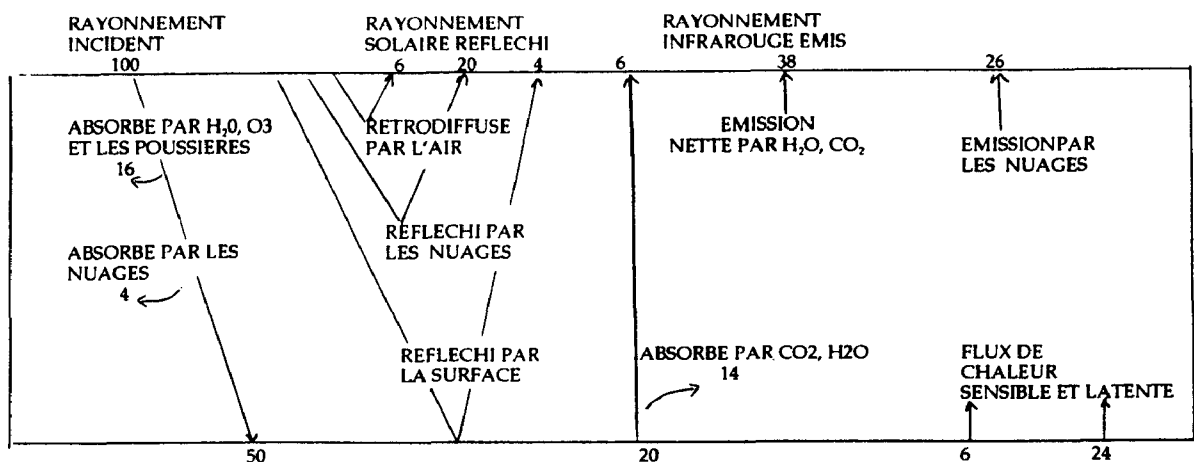


Figure 1 : équilibre thermique du système au sommet de l'atmosphère, à la surface de la Terre et dans l'atmosphère

Il apparaît sur ce schéma une autre source d'énergie pour l'atmosphère qui correspond à une perte d'énergie pour la surface de la Terre. Quand la surface subit une évaporation, elle se refroidit car ce changement d'état de l'eau nécessite de l'énergie. De même, quand cette eau évaporée condense pour donner des précipitations (pluie, ou neige et grêle à basse température) il y a dégagement de chaleur dans l'atmosphère. L'intérieur d'un nuage est plus chaud que l'air qui l'entourne. Ce phénomène de changement d'état est essentiel pour comprendre l'équilibre thermique du système : en effet, il correspond à la plus grande source d'énergie de l'atmosphère.

### 3 . Transports d'énergie

Remarquons aussi que l'absorption du rayonnement solaire est plus importante à la surface de la Terre que dans l'atmosphère. Ceci implique que le réchauffement se fait par le bas de l'atmosphère. Et quand la variation verticale de température (le gradient vertical) dépasse un certain seuil, on voit apparaître de la convection. Dans l'air qui contient de la vapeur d'eau, les mouvements ascendants liés à la convection provoquent souvent de la condensation. En effet, la quantité de vapeur d'eau dans l'air est limitée par la pression de vapeur saturante, cette dernière variant très rapidement avec la température. Or l'air en s'élevant se refroidit par détente (adiabatique), on voit alors apparaître dans l'atmosphère des nuages convectifs (tels que cumulus ou cumulo-nimbus). Cette convection (humide) permet le transport de la chaleur des basses couches vers les hautes couches de l'atmosphère.

Considérons la distribution de température observée à la surface de la Terre en janvier (**Figure 2**). La température est plus élevée dans les régions subtropicales que vers les pôles. On peut noter aussi que la température dans les pays scandinaves est de l'ordre de 0°C. Bien sur, le désert de Libye en janvier est bien plus chaud (autour de 20°C). Cependant, ce contraste méridien est inférieur au contraste entre la Sibérie à -40°C et la Suède qui se trouvent à la même latitude. Ce dernier s'explique par la dynamique de l'atmosphère et de l'océan et par les transports de chaleur que les mouvements de ces fluides provoquent. Quand on s'intéresse au climat de notre planète, c'est-à-dire aux différents climats qui existent sur notre Terre, on ne peut ignorer cette source essentielle d'énergie.

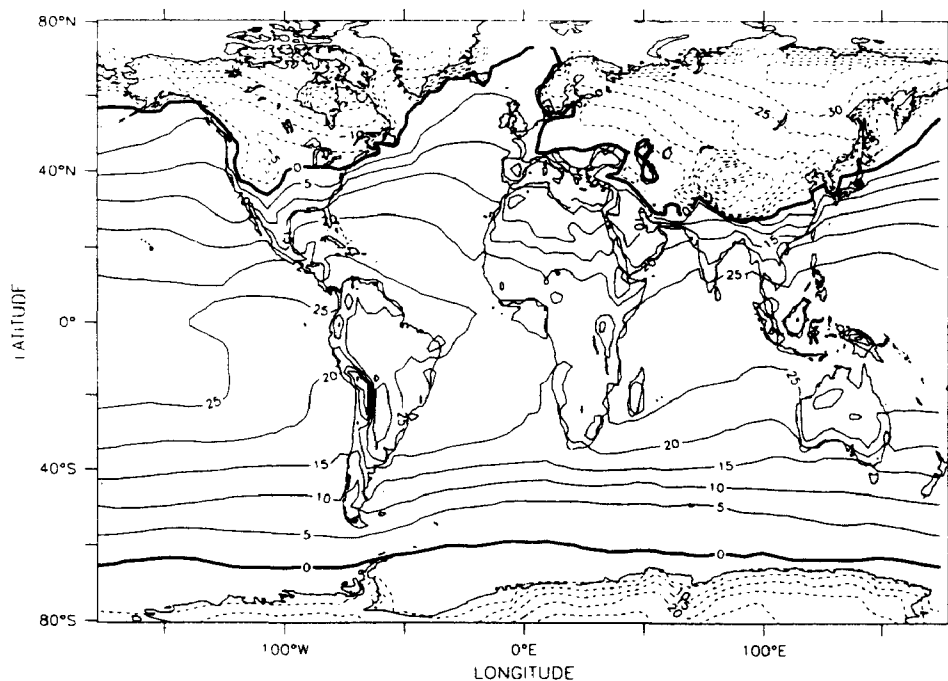
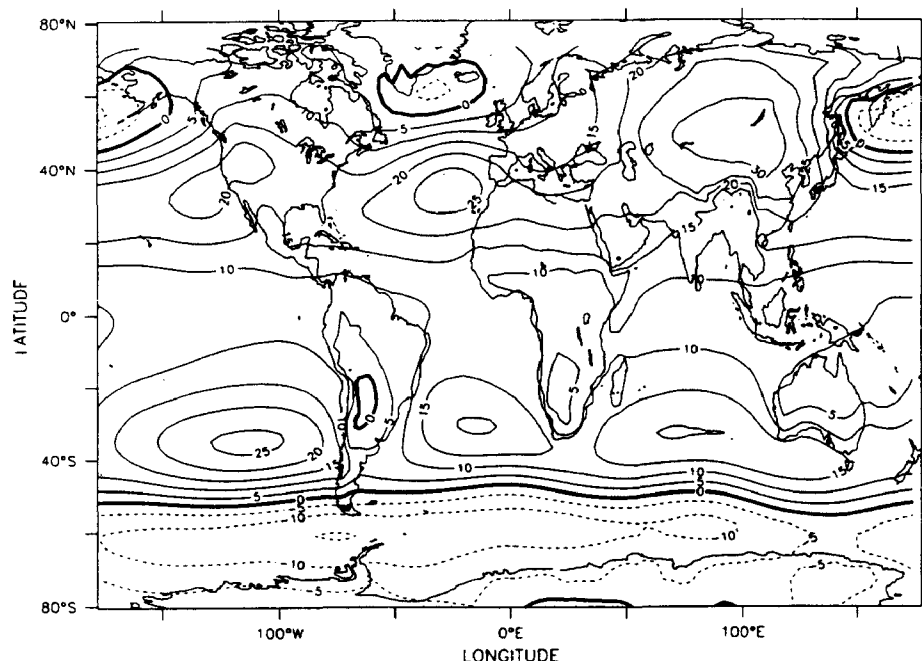


Figure 2 : distribution de température observée à la surface de la Terre en janvier.

On remarque que les isothermes sont plus rapprochées dans les régions de moyenne latitude, à l'Est des continents. Dans ces zones, la variation horizontale de température (le gradient méridien) est plus importante. On montre que ce sont des régions où naissent des dépressions qui vont produire les perturbations de temps que nous connaissons sur la France. Les dépressions sont générées par des instabilités liées au gradient horizontal de température et sont appelées instabilités baroclines.

On a en **Figure 3** une carte de la moyenne mensuelle de la pression, au niveau de la surface de la mer, telle qu'elle est observée en Janvier. On voit apparaître des oscillations de grande longueur d'onde (10.000 km) qui ont un rôle dans l'équilibre. Les vents, qui suivent (de manière approximative à basse altitude) ces isobares vont réchauffer les moyennes latitudes quand ils viennent des régions tropicales alors qu'ils vont refroidir les moyennes latitudes s'ils proviennent des régions polaires. De plus, le lieu privilégié des instabilités baroclines est lié aux zones de basse pression. Or ces instabilités baroclines sont essentielles dans les régions de moyenne latitude pour transporter l'énergie des régions subtropicales vers les hautes latitudes.



**Figure 3 : carte de la moyenne mensuelle de la pression en janvier**

*Ceci résume les mécanismes essentiels qui interviennent dans l'équilibre climatique. Ils sont nombreux et de plus, les échelles de temps et d'espace associées à ces processus*

*peuvent être d'ordres de grandeur très différents. Cependant, on ne peut comprendre les variations climatiques sans tenir compte de tous les processus qui ont été évoqués.*

## ***II - Variations climatiques***

Considérons la perturbation du climat due au doublement de CO<sub>2</sub>. Un doublement instantané du CO<sub>2</sub> crée une variation du rayonnement thermique donnée par cette figure. Cette variation est de quelques W/m<sup>2</sup>, et conduirait à un réchauffement dans les basses couches de l'atmosphère, de l'ordre de 0.5°C. Cependant, il y a des rétroactions dans le système climatique. Quand la température augmente, la vapeur d'eau augmente. Ceci s'explique aisément.

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est limitée car il y a condensation si la pression de vapeur dans l'atmosphère dépasse une limite, appelée pression de vapeur saturante. Cette pression est une fonction exponentielle de la température. La mesure de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère fait apparaître une variation saisonnière qui suit la variation saisonnière de température. Ainsi, dans l'hémisphère Nord, la quantité de vapeur d'eau, mesurée sur toute la colonne atmosphérique (cette quantité est appelée eau précipitable) est plus faible en janvier qu'en juillet et c'est l'inverse dans l'hémisphère Sud. Ces observations effectuées par M. Chahine au Jet Propulsion Laboratory (NASA) montrent aussi la décroissance de l'eau précipitable entre l'équateur et le pôle, et ceci aussi est lié à la variation de température.

On a évoqué le fait que la vapeur d'eau pouvait augmenter dans les basses couches mais décroître dans les hautes couches à cause de mécanismes complexes. Ce que montrent ces mesures obtenues récemment, c'est que la vapeur dans la haute troposphère suit les variations des basses couches et évolue en phase avec elles. Dans l'atmosphère réelle, les variations de vapeur d'eau dans la basse et la haute troposphère sont liées et de même signe.

Pour pouvoir étudier toutes les rétroactions possibles : évolution de la vapeur d'eau, des nuages, des glaces, de la température, il faut être capable de quantifier toutes les interactions et leurs perturbations. On a vu aussi que le transport par l'atmosphère et l'océan était aussi essentiel pour définir la distribution de température. C'est pourquoi, ces variations ne peuvent être évaluées qu'avec un modèle de circulation générale, qui résout de manière numérique toutes les équations associées aux processus évoqués. Malheureusement, ces modèles sont imparfaits pour de multiples raisons et les interactions qu'ils simulent doivent toujours être confrontées aux observations.

Les changements climatiques dus au doublement du CO<sub>2</sub> sont souvent définis par les variations de température et de précipitations. Les variations de température obtenues par le modèle couplé de l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) apparaissent sur la **figure 4 (Annexe I)** \* (Barthelet et al., 1998). La variation de température est plus importante sur les continents que sur les océans. Au Nord de l'Atlantique et du Pacifique, on voit apparaître une zone de réchauffement très faible. Ceci s'explique par la circulation thermohaline et le mélange important des couches océaniques dans ces régions. Ainsi, en Atlantique Nord le réchauffement est plus faible aux moyennes latitudes qu'aux basses latitudes. Ceci entraîne une augmentation des contrastes méridiens (ou gradient méridien) de température et pourra jouer sur les perturbations de moyenne latitude.

Un projet Européen (LSPCR) conduit par Jan Polcher a permis d'étudier les incertitudes des modèles liées à ce problème (Polcher et al., 1998, Polcher 1999). Quatre modèles de circulation générale atmosphérique, européens, ont simulé l'augmentation de CO<sub>2</sub> en prescrivant la même variation de température de l'Océan. Les chercheurs impliqués dans ce projet ont étudié l'influence des échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère sur cette réponse. On a ainsi effectué 8 expériences numériques qui ont permis de simuler le changement climatique dû au doublement de CO<sub>2</sub>.

Toutes ces expériences ont montré les résultats concordants suivants : une augmentation des pluies sur le Nord de l'Europe en hiver et une diminution des pluies en été sur le Bassin Méditerranéen. Bien évidemment, ces résultats dépendent des changements de température d'océan qu'on a imposés dans ces expériences numériques et qui proviennent de modèles couplés océan-atmosphère. Il est certain qu'il est primordial de confronter ces résultats à des observations pour les valider. Cependant, les résultats d'observations sont entachés d'une erreur qui est plus importante que les variations climatiques que l'on pourrait observer à l'heure actuelle.

*Il est certain que les implications sociales et économiques ont intensifié les débats où souvent des polémiques ont fait ombre au raisonnement scientifique. Les chercheurs travaillant sur ce sujet doivent constamment veiller à la rigueur de leurs travaux car l'exploitation de leurs résultats est plus qu'intense.*

---

(\*) *Les figures en annexe sont situées dans le rabat qui se trouve à la fin du Cahier*

On peut tout de même conclure que les interactions évoquées précédemment devraient amplifier la variation de  $0.5^{\circ}\text{C}$  qui interviendrait si les rétroactions ne jouaient pas. On peut aussi affirmer que les travaux sur ce sujet ont permis un développement extraordinaire de la compréhension des interactions du système climatique. Le développement des observations aussi permet de plus en plus de confronter les applications des mécanismes qui sont évoqués, aux interactions réelles. Une meilleure compréhension de la physique du système permettra de mieux en mieux de quantifier les variations du climat dues à l'augmentation du  $\text{CO}_2$  non seulement globalement mais de manière régionale.

**Katia LAVAL**  
**Professeur à l'Université Paris VII**

*Remerciements*

*L'auteur remercie J.L. Dufresne et M. Forichon pour lui avoir fourni et commenté les résultats du modèle couplé de l'IPSL, et J. Polcher pour lui avoir permis d'utiliser les résultats du Projet Européen LSPCR.*

**Références :**

Barthelet P., Bony S., Braconnot P., Braun A., Cariolle D., Cohen-Solal E., Dufresne J.L., Delecluse P., Deque M., Fairherad L., Filiberti M.A., Forichon M., Granddpeix J.Y., Guilyardi E., Houssais M.N., Imbard M., Le Treut H., Lévy C., Li Z., Madec G., Marquet P., Marti O., Planton S., Terray L., Thual O., et S. Valcke (1998) : Simulations couplées globales des changements climatiques associés à une augmentation de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub>. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes, 326, 677-684.

J. Polcher, J. Crossley, C. Bunton, H. D'Ouille, N. Gedney, K. Laval, S. Planton, P.R. Rowntree, and P. Valdes (1998) Importance of land-surface processes for the uncertainties of climate change ; A European project. GEWEX-NEWS.

POLCHER J. Rapport sur le Projet Européen "Land-Surface Processes and Climate Change". 1999



Figure 4 : Variations de température obtenues par le modèle couplé de l'IPSL

