

Depuis sa formation, il y a plus de quatre milliards d'années, notre planète se refroidit, en conformité avec le Deuxième Principe de la Thermodynamique. L'énergie de refroidissement émise est évaluée à 42 TW.

Mais, selon la Théorie du Réchauffement Global, depuis l'ère industrielle, et plus particulièrement depuis 1975, la Terre se réchaufferait rapidement. L'énergie de réchauffement stockée serait actuellement de 260 TW.

Commentaires sur le climat

Selon un rapport de l'IPCC, datant de 1990 : « la température moyenne de la terre est déjà plus chaude d'environ 33°C (pour une même réflexivité de la terre) qu'elle ne le serait si les gaz à effet de serre naturels n'étaient pas présents. »

On peut remarquer que, à l'équateur, et sous les mêmes hypothèses, la température atteindrait le jour 87°C et la nuit autour de -270°C, et que parler dans ces conditions de température moyenne n'a pas grand sens. Mais qu'importe, le message est clair : ce sont les gaz à effet de serre qui réchauffent la surface terrestre, et, évidemment, augmenter leur concentration ne peut que réchauffer davantage.

Effectivement, un objectif essentiel des études faites dans le cadre de l'IPCC est de montrer qu'une augmentation de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne une augmentation (excessive) de la température de la surface de la terre. Le but du présent exposé est d'attirer l'attention sur le fait que la théorie développée pour aboutir à cette conclusion ne se conforme pas, par certains aspects, aux lois de la Thermodynamique.

CLIMAT ET MODELES

Depuis sa formation, il y a quelques 4,5 milliards d'années, notre Planète se refroidit. Sa structure interne se compose de couches successives dont la température décroît du centre à la périphérie. Dans les dernières couches se succèdent, l'asthénosphère plastique, puis la lithosphère solide. La frontière entre les deux, qui se situe à 70-100 kms de profondeur est à une température de l'ordre de 1350°C. À partir de cette isotherme la température décroît d'environ 1°C/100m, un peu plus rapidement dans la croûte superficielle. Cette décroissance se poursuit dans l'atmosphère, de 0,6°C/100m, jusqu'à la tropopause, à une dizaine de kms. On évalue à 42 TW l'énergie correspondant au refroidissement de la Planète, soit par mètre carré de surface, un peu moins d'un dixième de watt. C'est actuellement une énergie faible, qui n'est pas significative à notre échelle de temps. Mais c'est le refroidissement depuis les origines qui a contribué à modeler la structure actuelle de l'ensemble terre-atmosphère.

1°-L'EVOLUTION PASSEE. Ce n'est pas ici le lieu de développer ce qu'a pu être l'évolution de l'atmosphère terrestre depuis les origines. Mais on peut cependant noter que, pendant une période se chiffrant en milliards d'années, cette atmosphère, initialement constituée de méthane, de vapeur d'eau, et d'hydrogène, s'est trouvée profondément modifiée dans sa composition par l'action indirecte d'organismes monocellulaires, pourvus de chlorophylle, les algues bleues. On explique, en effet, que ces algues, vivant dans des mers peu profondes, tiraient leur énergie de la photosynthèse d'hydrates de carbone, et ceci à partir de l'eau et du dioxyde de carbone dissous ou en composition sous forme de bicarbonate de calcium dans l'eau. Elles ont joué un rôle considérable puisqu'on leur doit, comme sous-produits de leur action, la formation de dépôts calcaires à l'origine de certaines de nos chaînes de montagnes, mais surtout l'apparition d'oxygène libre qui a constitué jusqu'à 30% de l'atmosphère. Depuis

quelques quatre cent millions, dioxyde de carbone, oxygène et eau, ont permis le passage de la vie des mers à la terre ferme avec de nouveaux développements de la vie végétale et de la vie animale.

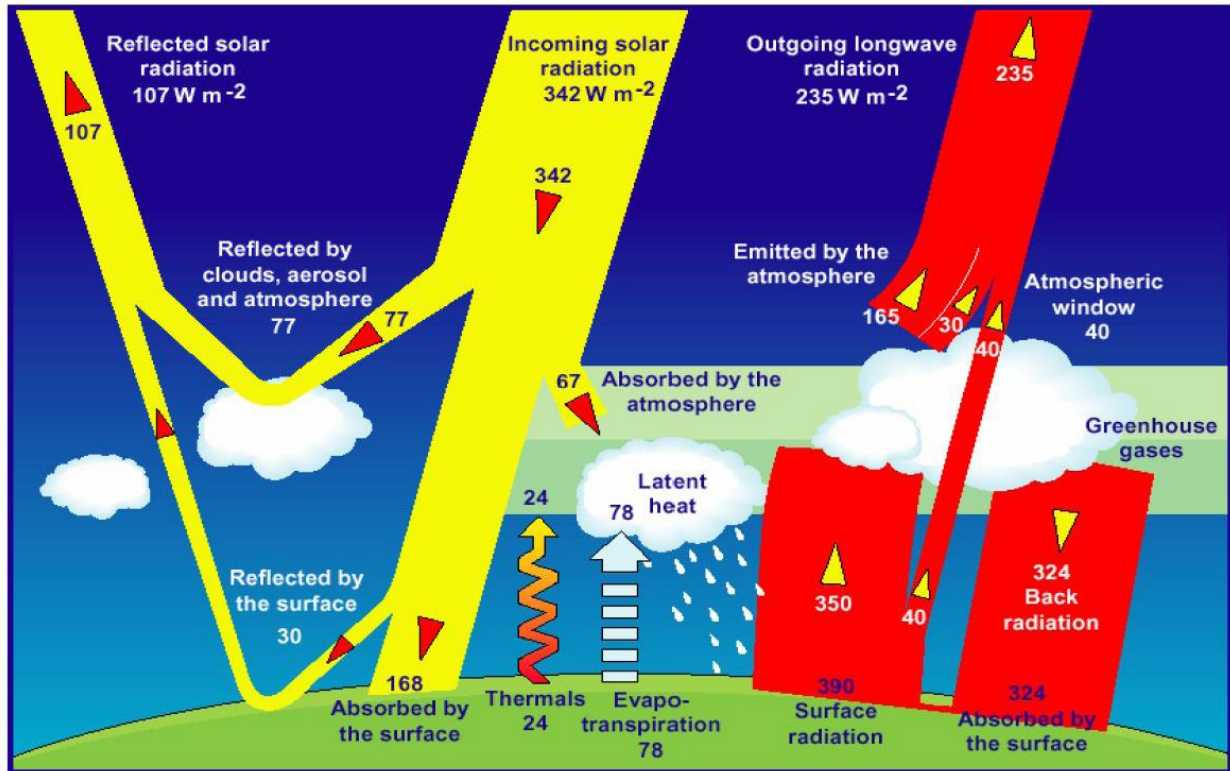
Ce simple rappel a pour objectif de mettre l'accent sur un point : depuis des centaines de millions d'années, la température de la surface des mers et des terres émergées, tout au moins sur des fractions étendues de celles-ci, s'est maintenue dans la fourchette étroite de variation où la vie et le développement des plantes et des animaux reste possible. Cependant, ce quasi-équilibre doit faire face à des variations considérables du niveau des émissions solaires atteignant la Terre, dans l'alternance des jours et des nuits, des saisons au cours des années, et dans la succession des périodes glaciaires, à l'échelle de la centaine de milliers d'années. Pour s'en tenir à la période actuelle, on estime que l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère de la terre, dans son parcours annuel autour du soleil, varie de 1420 W à 1330 W par m² du périhélie, au début janvier, à l'aphélie, début juillet. C'est l'énergie reçue lorsque le soleil est au zénith dans les régions équatoriales. L'ensoleillement moyen, le jour, est de l'ordre de 800 W/m² sous les tropiques, de 600 W/m² au 45° parallèle. L'énergie reçue au-delà des 45° n'est que de 18% du total. De plus, la fraction de ces 18% qui concerne les deux régions polaires est répartie sur des périodes de six mois.

Si on a cru bon de rappeler ici des faits évidemment bien connus, c'est qu'il est apparu nécessaire d'insister sur un point : le passage du jour à la nuit, de même que l'état permanent de déséquilibre créé par la différence de température entre les pôles et l'équateur, mettent en jeu des mécanismes de régulation à la mesure des perturbations. La relative petitesse des écarts de température qui en résulte, entre le jour et la nuit, entre les tropiques et les pôles, résulte des transferts d'énergie qui s'opèrent entre les réservoirs de chaleur que constituent les capacités calorifiques, des terres, des mers, de l'atmosphère et l'énergie accumulée dans les changements de phases de l'eau, de solide à liquide, de liquide à vapeur. Ces échanges sont le fait du rayonnement thermique, de la conduction, des transferts de chaleur associés aux courants marins, et des nombreux phénomènes qui affectent l'atmosphère. D'énormes masses d'air froid y transitent quasi quotidiennement des pôles vers l'équateur, remplacées par l'apport de courants plus chauds en direction des pôles ; des structures complexes de mouvements de convection s'y produisent dans les régions équatoriales ; des vents, plus ou moins permanents, de basse couche ou d'altitude, alizés ou jets la traversent ; s'y produisent encore des phénomènes plus localisés, mais souvent violents, orages, tornades, tempêtes, cyclones, mais qui, tous, manifestent la rapidité et la souplesse de réaction de l'atmosphère aux perturbations extérieures

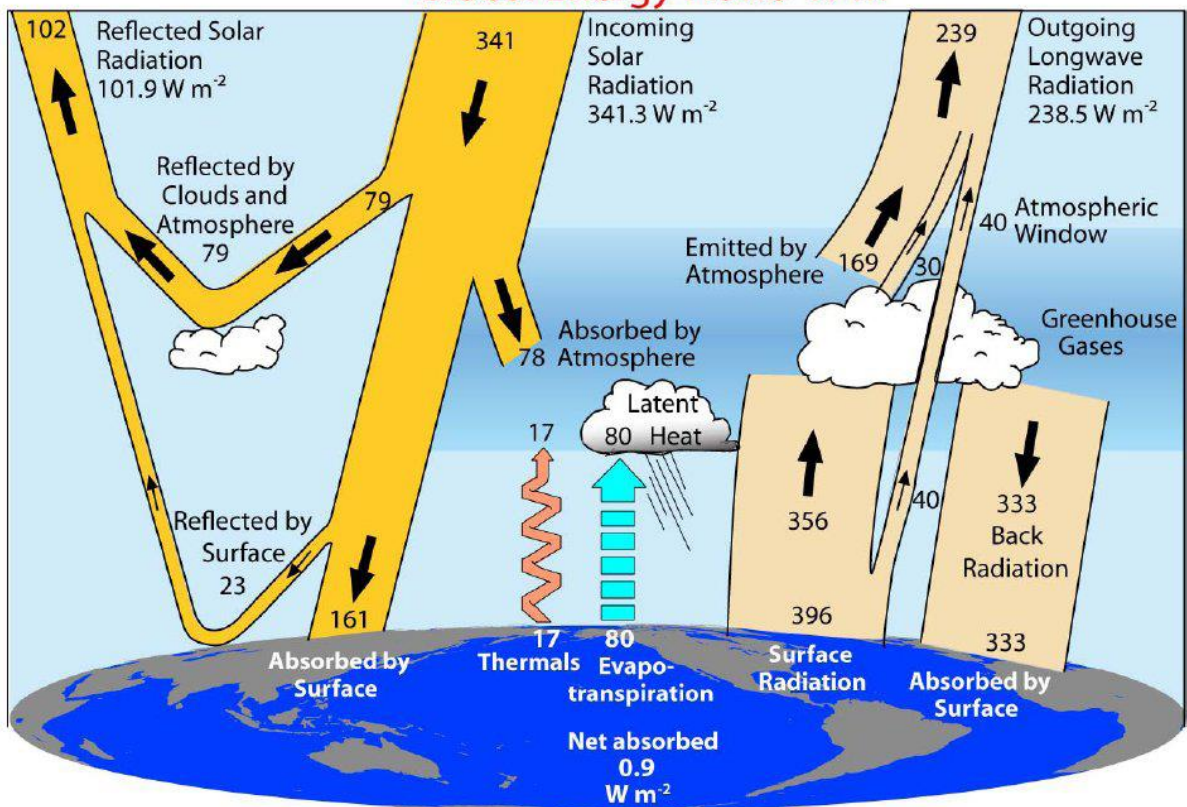
2°- LES MODELES CLIMATIQUES. L'étude de tous ces phénomènes est abordée de deux façons totalement différentes suivant l'objectif visé qui peut être, soit la prévision du temps à court terme, soit la détermination de l'évolution du climat à long terme

Grâce au traitement de données relatives à la température, la pression atmosphérique, la vitesse des vents, recueillies quotidiennement sur une dizaine de milliers de points de mesures, la « météo » peut prévoir, le plus souvent avec une précision satisfaisante, le temps qu'il fera avec quatre à six jours d'avance. Cette limitation dans la durée est due aux imprécisions des

RAYONNEMENT THERMIQUE ET THERMODYNAMIQUE



Global Energy Flows W m^{-2}



Sources : Kiehl-Trenberth, BAMS 1997, Trenberth et al., BAMS 2009

mesures et des techniques de calcul, mais aussi à des phénomènes météorologiques mal compris : les variations de l'Oscillation Atlantique Nord, et de l'oscillation Nord Pacifique, etc., phénomènes qui, pour l'instant, ne paraissent soumis qu'à la fantaisie d'Eole !

Le point de vue adopté dans l'étude de l'évolution du climat est tout différent : on s'y efforce de mettre en lumière les modifications qui pourraient être apportées à l'équilibre actuel par l'action de facteurs externes, variations des émissions solaires, rôle des volcans, gaz à effet de serre. Cet objectif ne peut être atteint, comme on vient de le voir, avec les moyens utilisés pour la prévision du temps. On s'efforce plutôt de dégager, sous l'extrême complexité du réel, des éléments jugés déterminants, ceux qui paraissent susceptibles d'atteindre la permanence cachée sous la diversité, ou le désordre, de l'apparence. C'est la démarche adoptée dans l'établissement des modèles relatifs au climat, les modèles de circulation générale (GCM), et les modèles de bilan d'énergie (EBM) développés par l'IPCC. Les modèles de circulation générales sont à deux dimensions, ils considèrent les déplacements verticaux et horizontaux de masses d'air. Les modèles (EBM), à une dimension verticale, ne peuvent prendre en compte que la convection.

3° LEUR VALIDITE. L'un de ces modèles EBM considère le bilan énergétique global moyen de l'ensemble surface terrestre et atmosphère et en étudie l'évolution. Les moyennes sont spatiales et temporelles. L'énergie totale reçue du soleil est supposée répartie également sur les régions tropicales et polaires, et répartie également entre les jours et les nuits, les hivers et les étés. C'est grâce à l'utilisation de tels modèles que des scientifiques ont cru mettre en évidence le rôle, supposé néfaste pour l'avenir de la Planète, de la croissance de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère. On peut s'interroger sur la validité de la transposition à un cas réel des résultats obtenus sur un modèle aussi simple et aussi éloigné de la réalité en ce qu'il ramène toutes les interactions de l'atmosphère à des échanges purement "verticaux". Un résultat de calcul sur une moyenne de valeurs n'est pas, en général, égal à la moyenne des résultats calculés sur chacune de ces valeurs. Les lois de la physique sont rarement linéaires. De plus, les réactions d'un système complexe à une perturbation mettent en jeu le plus souvent des mécanismes physiques différents selon que cette perturbation est forte ou faible. A priori, les résultats numériques obtenus ne peuvent être, au mieux, que considérés comme une indication non réellement chiffrée d'une éventuelle évolution. Quoiqu'il en soit, les calculs faits sur le modèle même prêtent le flanc à des critiques d'une autre nature, qui seront examinées plus loin.

Le schéma général du modèle EBM global, qui a pour but de mettre en évidence le rôle de l'effet de serre, est d'une grande simplicité. L'ensemble terre-atmosphère est assimilé à un grand réservoir de chaleur. Il reçoit un flux d'énergie du soleil, il émet un flux d'énergie en infrarouge. Si ces deux flux sont égaux, le bilan est nul, et la température du réservoir reste constante. Si la différence des flux, dit « forçage radiatif », est positive, soit que le flux solaire augmente, soit que le flux émis par la terre diminue, la température de l'ensemble terre-atmosphère doit augmenter pour faciliter l'évacuation du surplus d'énergie. Les gaz à effet de serre, présents dans l'atmosphère absorbent le rayonnement infrarouge, et augmenter leur concentration augmente l'absorption. Il en résulte donc que la température de la terre doit

augmenter.

Pour effectuer une évaluation quantitative de l'effet de serre, on est amené à préciser les rôles respectifs de la surface terrestre et de l'atmosphère. Le schéma se complique, il faut établir deux bilans au lieu d'un seul. Il faut évaluer les parts respectives de l'énergie solaire absorbées par la surface et par l'atmosphère, et de même les rôles respectifs de la surface et de l'atmosphère dans l'émission du rayonnement infrarouge. En outre, les échanges entre surface et atmosphère sont le fait, non seulement, du rayonnement thermique, mais aussi de la convection, de l'évaporation et de la condensation de l'eau échangée.

Le schéma adopté assigne une température unique à la surface terre-océans, et attribue à l'atmosphère, une température fonction de l'altitude. Ces grandeurs sont nécessaires au calcul du rayonnement thermique. Mais des difficultés se présentent : comment définir, par exemple, une température moyenne entre un kg de glace à 0°C et un litre d'eau à 10°C ? Du point de l'énergie thermique emmagasinée, la température moyenne est de 0°C, du point de vue du rayonnement thermique, elle est autour de 5°C. La difficulté est résolue en définissant la température de surface comme étant celle de l'atmosphère à 2m au-dessus du sol. Le bilan conserve ainsi une cohérence formelle. Mais c'est, en fait, une fausse "bonne idée", car la température de l'interface surface terrestre est très fluctuante. Une mesure de température à très faible profondeur des sols et des océans a davantage de sens.

Les deux figures jointes présentent un bilan établi en 1997 et sa version mise à jour en 2009. Les bilans diffèrent par les températures de surface adoptées, 15°C pour l'année 1977, 16°C pour l'année 2009, et par l'estimation de l'énergie fournie par conduction et chaleur latente.

4°-LEURS INSUFFISANCES. Dans l'établissement de ces modèles, comme d'ailleurs leur nom EBM l'indique, la plus grande attention est accordée à un point, évidemment fondamental, qui est celui de la conservation de l'énergie, et le plus grand soin est apporté à l'établissement de bilans énergétiques à l'équilibre. Mais les lois de la thermodynamique, qui régissent les systèmes complexes, n'y sont pas prises en compte. Il est vrai que leur application peut s'avérer difficile d'un point de vue quantitatif, mais elles permettent de définir en général le sens d'évolution des phénomènes. Elles sont, d'ailleurs, indispensables pour décrire même les transferts d'énergie les plus simples. Une énergie thermique n'a de sens physique qu'associée à son entropie ou à sa température. Il n'est pas indifférent qu'une même quantité d'énergie soit à faible entropie (énergie "concentrée"), ou à forte entropie (énergie "diluée") ; ou encore, en d'autres termes, qu'elle soit à haute température ou à faible température. Négliger cet aspect ouvre la voie à des descriptions ou des conclusions incorrectes du point de vue de la physique, et des descriptions de ce type abondent dans le domaine de l'effet de serre.

L'EFFET DE SERRE

L'effet de serre est effectivement un domaine où l'on trouve les explications les plus variées, et souvent rendues inexactes, par le désir de faire simple, ou par méconnaissance des principes physiques de base. L'idée le plus fréquemment évoquée est que les gaz à effet de serre de l'atmosphère absorbent, piègent l'énergie émise et réchauffe la surface terrestre. Un schéma plus élaboré, auquel se ramène la plupart des exposés, considère une couche atmosphérique

formée de gaz à effet de serre. Elle absorbe une fraction de l'énergie du rayonnement terrestre qui la traverse. Cette énergie est, à son tour rayonnée pour moitié vers l'espace, pour moitié vers la terre. Si la concentration en gaz à effet de serre augmente, la fraction absorbée et rayonnée à nouveau augmente, l'énergie totale rayonnée vers l'espace diminue et l'énergie rayonnée vers la terre augmente et vient la réchauffer. L'image des gaz à effet de serre comme jouant le rôle de « couverture », (*blanket*, dans les textes en anglais) est très largement répandue. On observe que ce schéma considère l'effet de serre comme un mécanisme autonome plaqué sur l'atmosphère. Son rôle y est comparable à celui d'un miroir semi-transparent, ou encore, à celui d'une plaque réfléchissante percée de trous. Mais la réalité est toute différente, les gaz à effet de serre ne peuvent pas être dissociés du reste de l'atmosphère.

1°MECANISMES. Les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone, et la vapeur d'eau. Une colonne atmosphérique, d'un mètre carré de surface au sol contient, en moyenne, environ 4kg de gaz carbonique et 25kg de vapeur d'eau, pour 10 tonnes d'azote et d'oxygène. Lorsqu'elles absorbent de l'énergie, des molécules de ces gaz passent d'un état "normal" à un état "excité", caractérisé, par exemple, par des mouvements internes de vibration, à fréquence déterminée, entre les atomes qui les composent. Mais l'énergie stockée ainsi est très faible, les molécules de gaz à effet de serre sont très peu nombreuses en comparaison des molécules d'azote et d'oxygène de l'atmosphère.

Un volume de gaz atmosphérique contient à la fois des molécules de gaz à effet de serre excitées et non excitées. Le rapport de leurs nombres respectifs est déterminé par la température des gaz qui les entourent, avec lesquels elles sont en équilibre thermique. Une molécule non excitée peut recevoir une énergie d'excitation d'un rayonnement thermique, mais plus fréquemment, elle la reçoit par chocs avec d'autres molécules de l'atmosphère. Une molécule excitée peut perdre son énergie d'excitation en la transmettant à un rayonnement par émission spontanée, mais plus fréquemment par chocs avec d'autres molécules de l'atmosphère. Globalement, les gaz à effet de serre, parce qu'ils ramènés constamment à un quasi-équilibre thermique avec l'ensemble des gaz environnants, jouent le rôle d'intermédiaires dans les échanges d'énergie entre ceux-ci, c'est-à-dire, l'atmosphère, et le rayonnement thermique. S'il y a stockage d'énergie, il se fait dans l'atmosphère. Et ces échanges sont intensifiés par une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre.

2°RAYONNEMENT ET TEMPERATURE. Dans le vide, un rayonnement thermique peut être décrit comme formé de la superposition d'ondes électromagnétiques planes élémentaires, chacune d'elle caractérisée par sa direction, la fréquence et l'intensité de l'énergie transportée. Cette description reste valable lorsqu'il s'agit d'un rayonnement traversant une couche atmosphérique. L'atmosphère, formée de gaz peu denses, ne modifie pas significativement leur propagation.

Le schéma suivant permet d'examiner plus en détail les échanges d'énergie entre rayonnement et atmosphère. Soit, donc, une couche atmosphérique contenant des molécules d'un gaz à effet de serre en équilibre thermique avec elle. Une onde transportant de l'énergie à la fréquence d'excitation des molécules et traversant la couche échange de l'énergie avec ces molécules. Dans son parcours, elle cède de l'énergie aux molécules non excitées, proportionnellement à l'énergie qu'elle transporte, mais elle reçoit également de l'énergie des molécules excitées, par

émission spontanée, et cette énergie reçue ne dépend pas de l'énergie transportée. Une onde qui, à la traversée d'une couche atmosphérique, conserve son énergie initiale, l'énergie cédée étant égale à l'énergie reçue, peut être considérée comme en équilibre thermique avec la couche, elle a la même température qu'elle.

Si sa température est plus petite, autrement dit si son énergie initiale est plus petite, dans sa traversée de l'atmosphère, elle en reçoit plus d'énergie qu'elle ne lui en cède, elle la refroidit. Si sa température est supérieure à celle de l'atmosphère, autrement dit, si son énergie initiale est supérieure à l'énergie d'équilibre, elle cède au total de l'énergie à l'atmosphère, elle la réchauffe.

Les transferts d'énergie thermiques entre rayonnement et atmosphère, par l'intermédiaire des gaz à effet de serre, manifestent donc une tendance à l'égalisation des températures par transfert de corps chaud à corps froid. Il en est évidemment de même pour les échanges d'énergie par rayonnement entre tous corps quelconques, solides, liquides ou gazeux dont les températures sont inégales. En ce sens le transfert d'énergie thermique par rayonnement n'est pas différent des autres mécanismes de transfert d'énergie thermique.

La notion de température de rayonnement introduite ici peut être définie d'une manière plus précise, quantitative, grâce aux travaux de M. Planck. Elle permet de décrire d'une façon très intuitive les échanges d'énergie entre rayonnement thermique et atmosphère, et par là, de corriger nombre d'idées ou d'interprétations fausses que l'on trouve même dans les exposés considérés comme les plus établis concernant l'effet de serre.

Les calculs concernant l'effet de serre les plus élaborés associent à chaque onde élémentaire de direction et de fréquence données, une équation dite de « transfert radiatif ». Le calcul des échanges entre rayonnement thermique et atmosphère revient à évaluer le flux d'énergie montant de la surface terrestre vers l'espace, et le flux descendant de l'espace vers la surface. Le flux montant est la somme de toutes les énergies transportées en direction de l'espace par l'ensemble des ondes élémentaires issues de la surface. Symétriquement, le flux descendant représente la somme des énergies transportées vers la surface par l'ensemble des ondes élémentaires issues de l'espace. Cette méthode de calcul trouve sa justification dans le fait, ou du moins, dans l'hypothèse qui en est faite, que l'équilibre thermique entre les molécules de gaz à effet de serre et les autres molécules de l'atmosphère est atteint beaucoup plus vite qu'il n'est détruit par l'interaction avec le rayonnement.

On remarque que les calculs séparent dans l'équation de transfert radiatif, écrite sous sa forme habituelle, l'absorption du rayonnement incident tout au long de sa traversée du rayonnement propre de l'atmosphère. Cette séparation est la source d'interprétations inexactes. Elle donne une image fautive de ce que sont les échanges à l'échelle locale, et exclue la notion température de rayonnement.

Cependant, attribuer des températures aux rayonnements ascendant et descendant permet de rendre évident le sens de leurs échanges, comme le montre le développement suivant. La température de l'atmosphère décroît de la surface terrestre jusqu'au sommet de la troposphère. Le rayonnement ascendant issu de la surface, toujours plus chaud que l'atmosphère dans sa traversée, lui cède peu à peu de l'énergie, avant d'être émis dans l'espace.

Le rayonnement descendant transporte une énergie très faible à son entrée dans l'atmosphère. Beaucoup plus froid qu'elle, il en reçoit constamment de l'énergie jusqu'à son absorption à la surface. Le rayonnement descendant absorbe plus d'énergie de l'atmosphère que le rayonnement ascendant ne lui en fournit.

Dans le mode de description qui précède, on admet qu'une onde élémentaire conserve son « individualité » à sa traversée, de sa face A à sa face B, d'une couche atmosphérique. Mais à chaque onde élémentaire correspond une onde élémentaire de direction opposée, traversant la couche de la face B à la face A. On peut évidemment, dans un deuxième mode de description, représenter l'interaction par les énergies des ondes entrant et sortant par la face A, et par les énergies des ondes sortant et entrant par la face B. Ce deuxième mode est mieux adapté que le précédent au cas, par exemple, où la « couche » est en fait un milieu solide dans lequel les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager, et où les transferts d'énergie sont assurés par d'autres moyens.

3° L'INTERPRETATION SELON L'IPCC. Curieusement, dans les travaux faits sous l'égide de l'IPCC, on constate que les calculs que l'on peut considérer comme les plus complets, basés sur l'équation de « transfert radiatif », utilisent le premier mode de description, mais que la présentation des résultats obtenus est faite suivant le second mode, et d'une manière propre à bien mettre en évidence le rôle de « couverture chauffante » de l'effet de serre. Et cette description s'appuie en outre sur la séparation artificielle des mécanismes d'absorption et d'émission que suggère l'équation de transfert radiatif écrite sous sa forme habituelle.

Cependant, comme il a été souligné précédemment l'interprétation littérale de l'équation de transfert conduit à des conclusions fausses. Le rayonnement ascendant, issu de la surface, n'est pas, comme il est souvent décrit, absorbé essentiellement dans les basses couches de l'atmosphère. L'énergie émise dans l'espace ne provient pas uniquement des hautes couches. Tout au contraire, comme il a été décrit plus haut, l'énergie transportée par le rayonnement issu de la surface décroît continûment jusqu'à la troposphère, et l'énergie venant de l'espace croît continûment du haut de la troposphère jusqu'à la surface. Toutefois, bien que l'équation de transfert ne rende pas compte des échanges au niveau local, elle donne, en principe, une valeur correcte pour l'énergie émise au sommet de la troposphère ; et la différence entre l'énergie issue de la surface, et l'énergie émise au sommet de la troposphère, donne la valeur de l'énergie cédée à l'atmosphère par le rayonnement ascendant.

Le schéma EBM de Trenberth joint à ce texte illustre bien, dans sa présentation du bilan énergétique infrarouge de l'atmosphère, la façon dont on conçoit, selon l'IPCC, le mécanisme de l'effet de serre. Tout se passe comme si, à mi-chemin de la troposphère, existait une couche de gaz à effet de serre définissant un niveau d'émission caractéristique (CEL), opaque au rayonnement infrarouge, qui absorbe le rayonnement issu de la surface et le réémet vers elle en quasi-totalité. Le rayonnement émis en direction de l'espace est le fait de gaz situés au-dessus de la couche. Cette description fait apparaître comme évident le rôle de couverture des gaz à effet de serre. Elle s'efforce, semble-t-il, de donner un sens physique à la séparation artificielle, introduite dans l'équation de transfert radiatif entre absorption et émission. Cependant, on n'observe pas, dans la température de l'atmosphère, une quelconque discontinuité qui puisse

correspondre à une couche particulière. La partie du diagramme correspondant à l'émission vers l'espace ne fait pas non plus état d'un rayonnement dans la direction opposée. En fait, les échanges d'énergie entre les rayonnements, ascendant ou descendant, et l'atmosphère se font de façon continue, de la surface au sommet de la troposphère, le niveau de l'échange de l'un ou l'autre des deux rayonnements étant défini localement par la différence de sa température et celle de l'atmosphère, et par la concentration des gaz à effet de serre.

L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION EN CO₂

Un objectif essentiel des études menées dans le cadre de l'IPCC est de préciser les effets de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur l'évolution du climat. La question ne peut avoir de réponse simple. En effet, pour établir le bilan de l'état actuel du rayonnement thermique, on évalue les énergies échangées en connaissant la distribution de température de l'atmosphère et la concentration des différents gaz à effet de serre. Et on peut légitimement admettre que ces quantités d'énergie échangées sont précisément celles qui correspondent à l'équilibre thermique de l'atmosphère. Mais un changement de concentration doit modifier cet équilibre, et la distribution de la température de l'atmosphère devient alors une des inconnues du problème.

Pour évaluer l'effet de l'augmentation de la concentration, on peut, par une méthode d'approximations successives, calculer, sur le profil actuel de température de l'atmosphère, la variation de l'énergie échangée localement par l'ensemble du rayonnement, ascendant et descendant, en déduire un nouveau profil de température à utiliser pour une deuxième étape de calcul, et s'approcher ainsi, peu à peu, de la solution correcte.

LA METHODE IPCC. La solution présentée par l'IPCC est tout autre. On y constate tout d'abord, par un calcul fait sur le profil actuel de température de l'atmosphère, qu'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone augmente l'absorption du rayonnement issu de la surface et se traduit par un déficit d'énergie du rayonnement vers l'espace. Dans un bilan global des échanges d'énergie de l'ensemble terre-atmosphère, ce déficit à l'émission peut être considéré, suivant l'IPCC comme équivalent à une augmentation de l'énergie reçue : un « forçage radiatif ». La température de la surface est liée à l'émission vers l'espace par des relations complexes, mais qui, pour de petites variations, peuvent être approchées, mathématiquement parlant, par une relation linéaire. Les températures de surface et de l'atmosphère varient ainsi proportionnellement au forçage climatique. La conclusion qui en est tirée s'exprime simplement : tout se passe comme si la courbe représentant la température de l'atmosphère en fonction de l'altitude se trouvait déplacée parallèlement à elle-même d'un même écart de température. La valeur de cet écart est donnée par le produit par un coefficient, le "gain", de la valeur du forçage radiatif. Le problème est, bien entendu, d'évaluer le gain. Les résultats numériques varient suivant les modèles. Typiquement, un forçage radiatif de 3,6 W /m² donnerait une augmentation de la température de l'ensemble surface terre-atmosphère de l'ordre de 2,50°C pour un gain de 0,7. Pour faire bonne mesure, les calculs IPCC introduisent des phénomènes de réaction positive, le réchauffement par le gaz carbonique entraînant l'afflux de vapeur d'eau, qui est un gaz à effet de serre. Et, selon l'IPCC, la température s'en trouve considérablement augmentée.

2°CRITIQUES. Ce qui précède donne lieu à plusieurs remarques.

Le forçage radiatif est défini de la façon suivante, dans un texte qui, apparemment, a reçu « l'imprimatur » de l'IPCC : le forçage radiatif sur le système surface-troposphère est le changement net (descendant moins ascendant) du rayonnement solaire+infrarouge calculé à la tropopause". Ici, selon l'IPCC, on considère donc qu'un watt d'énergie à une température de quelques 255°K est équivalent à un watt d'énergie solaire. Cependant, l'effet, en ce qui concerne l'assimilation chlorophyllienne, pour ne donner qu'un exemple, n'est pas le même. Ce point de vue ouvre effectivement la porte à la production d'énergie ordonnée dans un mouvement perpétuel de deuxième espèce, procédé mal vu par l'Académie des Sciences. En bref, cette équivalence n'a strictement aucun sens physique. A une énergie thermique doit nécessairement être associée, soit une entropie, soit une température. Reste que, pour donner corps à la conclusion énoncée, c'est-à-dire, à l'augmentation de la température, on pourrait considérer que le blocage, l'opposition au passage de l'énergie par le surcroît de dioxyde de carbone, provoque un réchauffement de l'atmosphère par l'accumulation de cette énergie. Il n'en est rien. C'est qu'en effet le rayonnement descendant de la troposphère, dont l'existence est constamment oubliée dans les considérations précédentes, reçoit de l'atmosphère une quantité d'énergie supérieure à celle qui lui est fournie par le rayonnement ascendant, et que, au total, l'atmosphère est refroidie.

La deuxième remarque concerne le calcul du gain. Les estimations de ce gain, telles qu'elles sont rapportées dans les publications courantes, sont faites sur le modèle simple comportant une couche "autonome" de gaz à effet de serre auquel il a été fait référence précédemment. Elles ne peuvent guère avoir de sens, compte tenu du fait que l'effet de serre ne peut en réalité se concevoir que comme partie intégrante de l'ensemble de l'atmosphère. Mais les textes assurent que le modèle complet, qui donne des résultats plus précis, n'est rien d'autre qu'une généralisation de ce modèle simple.

De fait, la conclusion à laquelle aboutissent les études menées à l'IPCC, c'est-à-dire l'augmentation de la température de la surface terrestre sous l'action d'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère, paraît en contradiction avec les lois issues du deuxième principe. Un système thermodynamique tend de lui-même vers un état d'énergie minimum, compatible avec ses contraintes. Tous les mécanismes de transfert d'énergie qui entrent en jeu, directement ou indirectement dans l'effet de serre, l'interaction entre rayonnement thermique et matière, la conduction thermique, la convection, l'évaporation... se caractérisent par une transmission de chaleur de corps chauds à corps plus froids, avec production d'entropie. On conçoit difficilement qu'il puisse en résulter une augmentation de la température de l'ensemble de l'atmosphère, de la troposphère à la surface.

Quoiqu'il en soit, en bonne physique, déterminer la relation qui existe entre les variations de température de la surface et les fluctuations d'émission, c'est résoudre en fait le problème tel qu'il a été posé précédemment, c'est-à-dire qu'il est nécessaire d'évaluer effectivement les modifications engendrées par l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone, d'une part dans la distribution de température de l'atmosphère et, d'autre part dans les apports

d'énergie de la surface terrestre.

S'il ne paraît pas impossible d'évaluer les variations de température de l'atmosphère dues au rayonnement, par contre les variations des apports d'énergie ne peuvent pas être évaluées avec une précision suffisante. Les échanges à l'interface surface terrestre et atmosphère sont extrêmement complexes et leur estimation doit beaucoup à la nécessité d'aboutir à des bilans d'énergie équilibrés. Il semble bien qu'il ne soit pas possible, actuellement, d'aboutir à une estimation chiffrée "significative" de l'effet de l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone sur le climat

3°UNE INTERPRETATION QUALITATIVE. La notion de température de rayonnement permet de présenter sous un jour différent les problèmes que pose l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. On a vu précédemment qu'elle permettait de définir le sens des échanges d'énergie entre rayonnements ascendant et descendant d'une part, et l'atmosphère d'autre part, tout au long de leurs traversées. On peut encore préciser que, à toute altitude, et jusqu'au bas de l'atmosphère, le rayonnement ascendant est plus chaud que l'atmosphère, qui est, elle-même, plus chaude que le rayonnement descendant. L'écart de température entre rayonnement ascendant et l'atmosphère est plus petit que l'écart de température entre rayonnement descendant et atmosphère, et il en résulte que l'ensemble du rayonnement tend à refroidir l'atmosphère.

Une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone améliore les transferts d'énergie entre les rayonnements et l'atmosphère. Par suite, à une altitude donnée, les écarts de température entre les deux rayonnements et l'atmosphère diminuent, et, d'après ce qui précède, la température de l'atmosphère doit décroître. Cet effet est peu important au sommet de l'atmosphère où la densité des molécules de dioxyde de carbone est faible. Il est plus intense dans les basses couches, où la densité est plus forte. Les rayonnements et l'atmosphère y manifestent une tendance à la réalisation d'un équilibre thermique entre les rayonnements ascendant, descendant, et l'atmosphère, et cette température d'équilibre thermique doit être inférieure à la température initiale. Globalement, par conséquent, augmenter la concentration en dioxyde de carbone tend à abaisser la température de l'atmosphère au voisinage de la surface, à améliorer l'équilibre thermique entre l'atmosphère et les rayonnements, et notamment à diminuer l'énergie transmise par le rayonnement ascendant à l'atmosphère dans les basses couches. En outre, la décroissance du gradient de température de l'atmosphère qui en résulte entraîne une diminution de l'énergie stockée dans l'atmosphère, comme on peut l'attendre de la loi de Le Chatelier, appliquée à un système stable.

Mais il est clair, enfin, que pour définir ce que peut être l'état final de l'atmosphère, après augmentation de la concentration en dioxyde de carbone, il faut tenir également compte des modifications des apports d'énergie par conduction, convection de vapeur d'eau, dues au refroidissement de l'atmosphère. Quoiqu'il soit, la conclusion de ce développement est claire : l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone, ou de tout autre gaz à effet de serre, tend à faire abaisser la température de la surface et à faire décroître le gradient de température de l'atmosphère.

CONCLUSIONS

« La température moyenne de la terre est déjà plus chaude d'environ 33°C qu'elle ne le serait si les gaz à effet de serre naturels n'étaient pas présents ». Cette phrase, rappelée en introduction, contient en filigrane ce que doit être, selon l'IPCC, l'orientation des études sur l'évolution du climat. En effet, aucun doute n'est plus permis, le réchauffement climatique est certain et la cause en est connue, c'est l'augmentation artificielle du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, due aux activités humaines. Dès lors, le but unique des recherches est de préciser l'ampleur du réchauffement et de mettre en évidence toutes les conséquences néfastes, voire catastrophiques qui ne peuvent que résulter d'une augmentation de température.

La façon dont est présenté l'effet de serre, à l'origine de ce réchauffement, revêt un caractère d'évidence. L'explication courante qui est donnée de son mécanisme séduit, en effet, par sa simplicité. Les gaz à effet de serre forment dans l'atmosphère une couche qui « piège » le rayonnement thermique et en renvoie une partie qui réchauffe la surface terrestre, de même qu'une couverture retient la chaleur et réchauffe. Et les résultats théoriques sur le sujet sont présentés d'une manière propre à bien mettre en évidence cette analogie.

On montre enfin, et c'est là le point essentiel, qu'une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone ne peut qu'accroître ce réchauffement. En effet, lorsque la concentration augmente, une fraction supplémentaire de l'énergie émise normalement vers l'espace est absorbée, et le bilan d'énergie, entrée-sortie au sommet de la tropopause n'est plus équilibré et tout se passe comme si l'atmosphère était soumise à un renforcement du rayonnement solaire d'une quantité égale au déficit d'émission, « le forçage radiatif ». On considère, en outre, que l'action propre du gaz carbonique est soumise à des mécanismes de réaction positive qui amplifient considérablement ses effets.

Ces deux points, le rôle de « couverture » de l'effet de serre, et d'autre part le réchauffement provoqué par l'accroissement de la concentration en gaz carbonique, sont devenus des faits indiscutables, acceptés de tous ; et si des doutes se font jour, ce n'est pas sur ces faits en eux-mêmes qu'ils portent, mais sur leur importance, ou encore sur le rôle des réactions positives qui leur sont associées.

Ces derniers paragraphes, qui rappellent des points essentiels de ce qu'est l'effet de serre selon les études menées dans le cadre de l'IPCC, soulèvent des questions, et sur la validité des résultats obtenus et finalement sur l'orientation même donnée à ces études.

Ce qui se dégage de ces études et de leur interprétation, c'est qu'elles supposent que les mécanismes de fonctionnement de notre Planète sont foncièrement instables, à la merci du bon vouloir du dioxyde de carbone. Ce gaz, en quantité limitée, dont l'action directe est en principe reconnue comme minoritaire, est censé contrôler l'action de la vapeur d'eau dont la source est, elle, illimitée, et, en définitive, tout ce qui est effet de serre. C'est, avec un décalage d'une à deux décennies, un substitut à « l'effet papillon » des années 60 !

Tout d'abord, il faut noter que dans aucun de ces développements sur l'effet de serre, il n'est fait usage des lois de la Thermodynamique. Cette carence a conduit à des interprétations, inexactes du point de vue de la physique, de calculs corrects par ailleurs. Lorsqu'il s'agit d'énergie thermique, de chaleur, on définit des corps chauds et des corps froids, chacun d'eux caractérisé par une température. Le moteur des échanges d'énergie entre eux est leur différence de température. Le transfert d'énergie se fait de corps chaud à corps froid, tendant à l'égalisation des températures et le transfert s'arrête si l'équilibre thermique est atteint, c'est-à-dire, si les températures sont égales. Rappeler ces évidences que, bien entendu, nous connaissons tous n'est pas hors de propos. Il apparaît, en effet, qu'elles sont absentes dans nombre d'exposés où leur présence aurait dû s'imposer

Peu nombreuses, les molécules de gaz à effet de serre ne peuvent stocker qu'une énergie négligeable. Mais, parce qu'elles sont en équilibre local avec les autres gaz de l'atmosphère, tout se passe comme si elles servaient d'intermédiaires dans les transferts d'énergie entre les rayonnements thermiques et ces autres gaz. Et augmenter leur concentration améliore les transferts. Le sens des échanges est déterminé par les températures locales respectives des rayonnements et de l'atmosphère. Un rayonnement chaud, issu de la surface terrestre cède de l'énergie à l'atmosphère plus froide. Un rayonnement froid, issu de l'espace reçoit de l'énergie de l'atmosphère plus chaude.

Ce sont les échanges d'énergie entre les réservoirs d'énergie, que constituent les différentes parties de l'atmosphère et une mince couche de la surface terrestre, qui atténuent les écarts de température, par exemple entre le jour et la nuit. C'est l'effet de « couverture », attribué à l'effet de serre, où, naturellement, le rayonnement thermique joue un rôle, notamment grâce au rayonnement descendant, mais où, aussi, participent tous les autres modes d'échange d'énergie, la conduction, les transports de matière par la convection, les vents, etc. Tous ces mécanismes, à l'échelle locale, contribuent à « lisser » les températures, en tendant à établir l'équilibre thermique, en particulier, entre l'atmosphère et la surface terrestre.

Il faut attribuer, semble-t-il, à l'absence de référence à la thermodynamique la notion singulière de « forçage radiatif » qui est utilisée pour mettre en évidence l'augmentation de température provoquée par une augmentation de la concentration en dioxyde de carbone. Cette notion, qui assimile, dans ses effets, un déficit d'émission d'un rayonnement froid vers l'espace à un excédent de rayonnement solaire, ne peut que conduire à des conclusions erronées. Quels que soient les détours utilisés dans la suite des raisonnements, ce déficit d'émission ne peut pas entraîner, comme l'affirme le rapport IPCC, une augmentation globale uniforme de la température de l'atmosphère dans son ensemble. L'analyse qualitative des échanges d'énergie entre le rayonnement ascendant chaud, le rayonnement descendant froid, et l'atmosphère montre, d'ailleurs, qu'une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre contribue à faire décroître la température de l'atmosphère et son gradient dans les basses couches, et à améliorer la continuité du profil de température entre la surface et l'atmosphère.

Les études qui sont faites dans la cadre de l'IPCC au titre de l'effet de serre sont axées sur un objectif, montrer l'action nocive du dioxyde de carbone produit par les activités humaines. Cette

focalisation sur le dioxyde de carbone conduit à une image, non seulement étriquée, mais fautive, de la réalité du climat. Comme on l'a indiqué précédemment, l'effet de serre ne peut pas être considéré comme un mécanisme autonome plaqué sur l'atmosphère. Le rayonnement thermique n'est que l'un des mécanismes qui participent aux échanges d'énergie entre les gaz à effet de serre, l'atmosphère en son entier, et une mince couche de la croûte terrestre. C'est tout cet ensemble qu'il faut inclure dans un même calcul pour aboutir à une évaluation quantitative de l'action du dioxyde de carbone sur le climat. Mais il est vrai qu'il subsiste trop d'incertitudes sur les échanges complexes d'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère pour qu'il soit possible d'aboutir à des estimations numériques de quelque valeur.

Mais sans même prétendre à des prévisions quantitatives, il reste beaucoup à faire pour mieux comprendre le fonctionnement des mécanismes de régulation du climat.

À supposer constante l'énergie qu'elle reçoit du soleil, la Planète ne peut que se refroidir.

Dès lors, la question n'est pas de s'obstiner à prouver que le dioxyde de carbone ne peut qu'engendrer des catastrophes, mais elle est de mieux comprendre comment se régule le cycle de l'eau, vapeur et nuages, et comment se modifie l'atmosphère et son profil de température, pour évacuer, sous forme de rayonnement vers l'espace, l'énergie thermique excédentaire.