GAENA
(ex GASN)

Fiche N° 14 Ind. 5 du 20 novembre 2023

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA

Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaire et Alternatives

EFFET DE SERRE

1. QU'APPELLE-T-ON EFFET DE SERRE ?

1.1. L'ÉNERGIE À LA SURFACE DU GLOBE

La Terre reçoit son énergie du soleil sous forme de rayonnement lumineux (ultra-violet, visible et proche infrarouge), à raison de 340 watts par mètre carré, en moyenne globale au sommet de l'atmosphère. C'est l'énergie qui fait fonctionner toute la machinerie climatique[1]. Environ la moitié de cette énergie traverse toute l'épaisseur de l'atmosphère et atteint la surface du globe. L'atmosphère et la surface réfléchissent vers l'espace ≈ 30 % de l'énergie incidente. Les 70 % restants sont absorbés par la surface terrestre et par l'atmosphère. Toute l'énergie lumineuse absorbée est transformée en chaleur. Pour que la température globale soit stable dans le temps, il faut qu'il parte de la Terre vers l'espace autant d'énergie qu'il en arrive du soleil. Outre les 30 % qu'elle réfléchit, la Terre doit donc émettre vers l'espace autant d'énergie qu'elle en a absorbé, soit ≈ 240 W par m^2.

La seule forme d'énergie que la Terre peut évacuer dans le vide est le rayonnement électromagnétique.
La Terre se comporte comme un corps noir, qui rayonne de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge avec une intensité qui croît très fortement avec la température (loi de Stefan-Boltzmann). Pour rayonner les 240 W par m^2, la surface de la Terre devrait avoir une température globale de - 18 °C, peu propice au développement de la vie telle que nous la connaissons. La température réelle à la surface est actuellement légèrement au-dessus de +15-°C. La cause de cette différence de 33 °C est le mécanisme de l'effet de serre.

1.2. LE PIÉGEAGE D'ÉNERGIE DANS LA BASSE ATMOSPHÈRE

Le rayonnement infrarouge émis par la surface du globe est absorbé presque totalement par l'atmosphère, par des gaz présents à l'état de traces. Ces mêmes gaz sont aussi émetteurs de rayonnement infrarouge. Une partie est donc émise vers le bas et contribue à échauffer la surface. La température de l'atmosphère décroit avec l'altitude (environ 7,5 °C par km).

L'intensité émise décroît fortement quand la température décroît. Les couches élevées de l'atmosphère, dont le rayonnement émis peut s'échapper vers l'espace, émettent donc moins que les couches basses. C'est ce processus qu'on nomme effet de serre (figure 1). Ainsi, la température radiative de -18°C a bien une existence physique, mais correspond aux couches élevées de l'atmosphère.

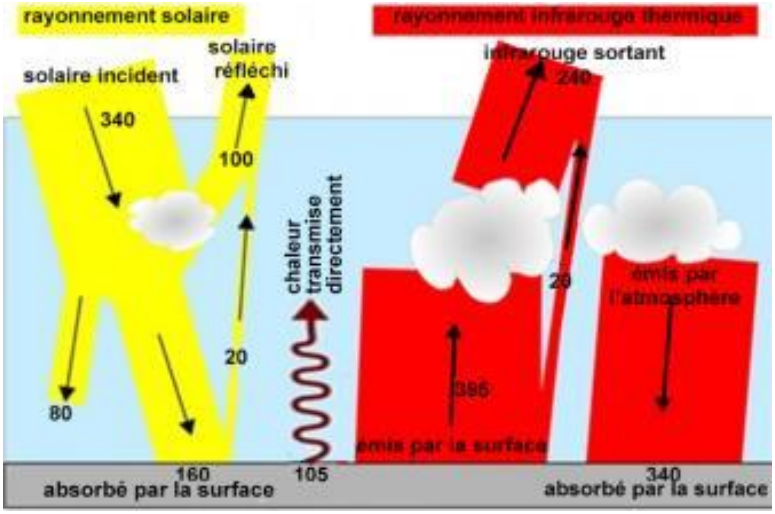

Figure 1 *- Les échanges de rayonnement et chaleur entre l'espace, l'atmosphère et la surface terrestre*

1.3. POURQUOI CE NOM D'EFFET DE SERRE ?

C'est par analogie avec la serre horticole. La vitre qui lui sert de toit laisse passer la lumière solaire. Le rayonnement incident est absorbé et transformé en chaleur dans la serre. En extérieur, l'air chaud, plus léger, s'élève par convection et est remplacé par de l'air froid. Dans la serre, l'air chaud est retenu par les parois. Dans l'effet de serre climatique, ce rôle de piégeage de la chaleur est joué par l'atmosphère. Il y a donc une analogie

[1] *Le flux de chaleur géothermique à la surface du globe est 6 000 fois plus faible que le flux solaire.*

avec la serre horticole mais les processus physiques en jeu sont très différents, mécanique dans le premier cas, radiatif dans le second.

2. LES GAZ À EFFET DE SERRE

2.1. EFFET DE SERRE NATUREL

On appelle gaz à effet de serre (GES) des gaz qui absorbent du rayonnement infrarouge dans le domaine de fréquence des rayonnements émis par la surface terrestre. Ce sont ces gaz qui sont responsables de l'effet de serre grâce auquel la température à la surface du globe a permis à la vie de s'y développer.
Les GES naturellement présents dans l'atmosphère sont, en ordre décroissant d'importance, la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et l'ozone (O_3). La contribution des divers gaz à l'effet de serre naturel est représentée à gauche sur la figure 2.

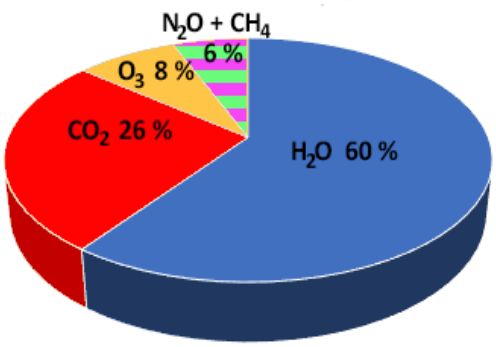

***Figure 2** – Contribution des GES à l'effet de serre naturel*

2.2. EFFET DE SERRE ADDITIONNEL

L'effet de serre est un processus naturel. On parle d'effet de serre anthropique, ou d'effet de serre additionnel, la part de l'effet qui est induit par l'augmentation de la concentration de certains gaz, du fait des activités humaines.

2.3. LE POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Les GES ne résident pas éternellement dans l'atmosphère. Selon les processus physiques, biologiques, ou chimiques qui éliminent le gaz de l'atmosphère, le temps de résidence atmosphérique varie beaucoup d'un gaz à l'autre. Par ailleurs, une masse donnée d'un gaz peut être plus ou moins efficace que le CO2 pour absorber le rayonnement infrarouge.

Pour comparer l'effet sur le réchauffement des divers GES présents dans l'atmosphère, on a défini le pouvoir de réchauffement global (PRG). Pour un gaz donné, le PRG est le facteur par lequel il faut multiplier le réchauffement produit par celui du CO_2 pour obtenir le réchauffement produit par la même masse du gaz considéré au bout d'un temps donné (100 ans quand on ne le précise pas).

Gaz	Temps de résidence (ans)	PRG à 100 ans
Dioxyde de carbone : CO_2	>> 1 siècle	1
Méthane : CH_4	12,4	28
Protoxyde d'azote : N_2O	121	265
CFC-115 : $CClF_2CF_3$	1 020	5 860
Tétrachlorure de carbone : CCl4	26	1 730
HCFC-22 : CHClF2	11,9	5 280
HFC-23 : CHF3	220	12 400
Hexafluorure de soufre : SF_6	3 200	23 500

***Tableau** 1 - Temps de résidence et PRG de divers gaz à effet de serre produits par l'homme*

La valeur du PRG (tableau 1) dépend de l'échéance à cause du temps de résidence et du devenir du gaz dans l'atmosphère. Ainsi le méthane qui a un PRG de 85 à l'échéance de 20 ans, voit son PRG réduit à 28 à l'échéance de 100 ans, du fait de son faible temps de résidence.

La vapeur d'eau émise par l'homme n'est pas comptabilisée dans l'effet de serre additionnel. La raison est de nature thermodynamique : la quantité de vapeur qui peut séjourner dans l'atmosphère dépend non de nos émissions mais de la température de l'air.

La contribution des principaux GES additionnel dû aux activités humaines est représentée sur la figure 3. Le CO_2 est responsable de de près de 60 % de l'effet de serre additionnel. Pour quantifier l'effet de serre additionnel, on exprime généralement les émissions anthropiques de GES en équivalent CO_2. L'équivalent CO_2 des autres GES est calculé en multipliant leurs émissions par leur PRG.

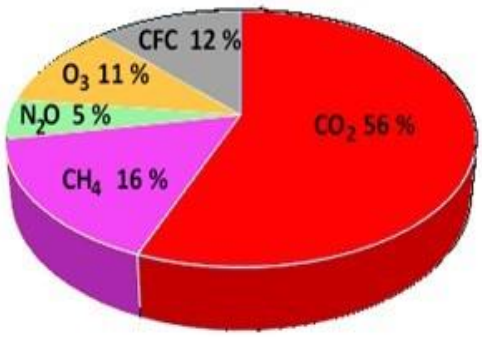

Figure 3 – *Contribution des GES émis par l'homme à l'effet de serre additionnel*

2.3.1. Le dioxyde de carbone CO_2

La très grande majorité (90 %) du carbone émis par les activités humaines est du carbone fossile : charbon, pétrole, gaz et quelques pourcents de carbone émis dans la fabrication du ciment. Les autres 10 % des émissions de carbone dans l'atmosphère proviennent des modifications de l'usage des sols, particulièrement par la déforestation[2].

2.3.2. Le méthane CH_4

Le méthane — commercialisé sous le nom de « gaz naturel » — se forme dans la décomposition anaérobie de la matière organique, qui émet le carbone pour moitié sous forme de CH_4 et pour moitié sous forme de CO_2. Il s'en forme donc naturellement dans la décomposition des déchets organiques (propriété mise à profit dans les méthaniseurs). Il s'en forme dans les zones humides, et donc dans les rizières. Il s'en forme aussi par la décomposition de la matière végétale dans la panse des ruminants.

2.3.3. Le protoxyde d'azote N_2O

L'émission anthropique de N_2O provient de l'oxydation des engrais azotés utilisés dans l'agriculture.

2.3.4. Les autres gaz à effet de serre

Des gaz qui ne se trouvent pas spontanément dans la nature sont produits par l'industrie, pour leurs propriétés physiques ou chimiques très utiles pour des applications particulières.
Le cas de l'ozone est à part : ce gaz n'est pas produit directement, mais résulte de réactions photochimiques induites par le rayonnement solaire sur des précurseurs émis par l'homme : oxydes d'azote, composés organiques volatils.

2.4. LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DES GAZ À EFFET DE SERRE AUGMENTE

Depuis plusieurs décennies, la concentration atmosphérique des GES fait l'objet d'un suivi régulier (figure 4).

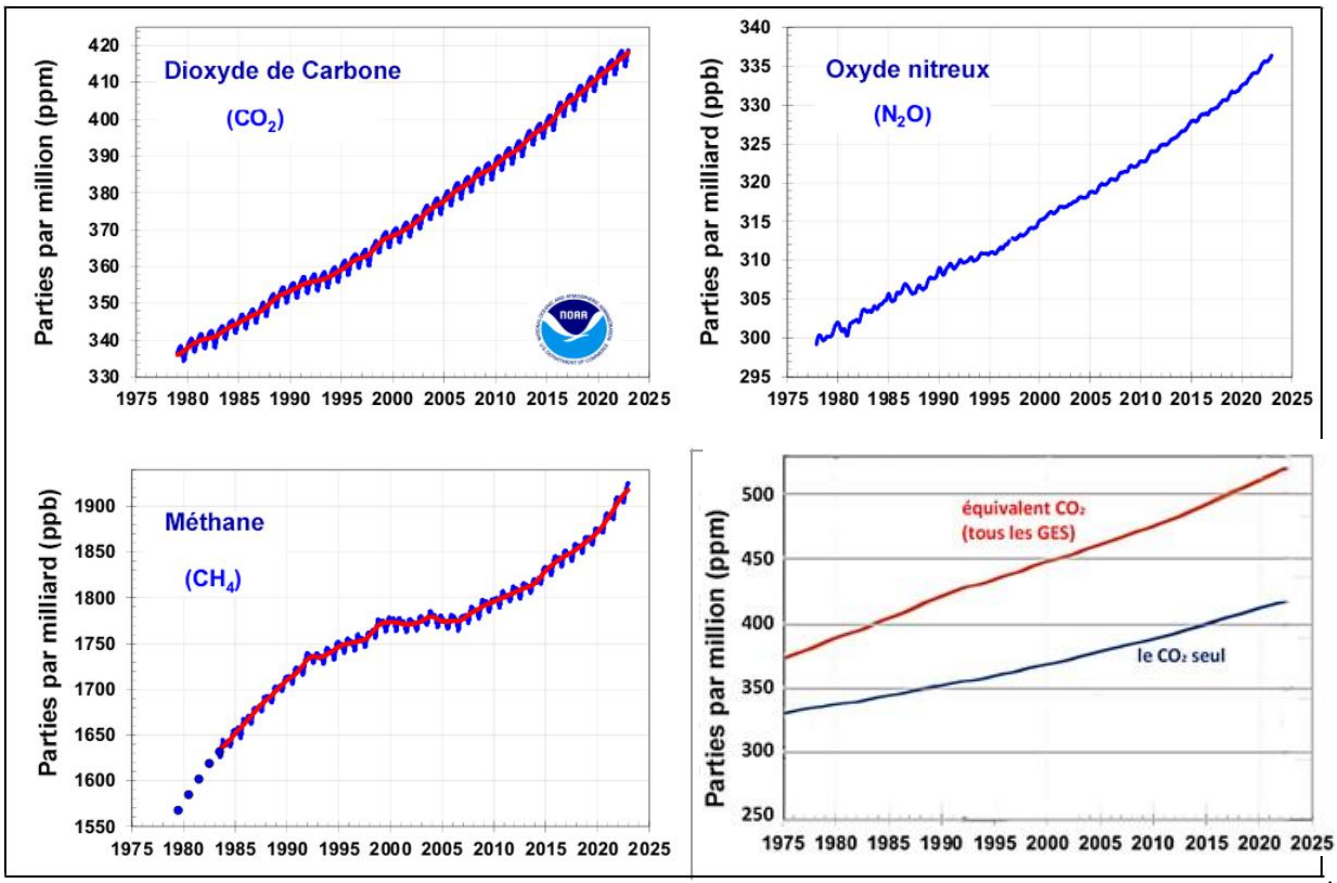

Figure 4 *- Évolution des concentrations atmosphériques du CO_2, du méthane et du protoxyde d'azote ; comparaison entre les concentrations du CO_2 et de l'ensemble des gaz à effet de serre, exprimées en équivalent de CO_2.*

[2] *Outre les émissions par la combustion du bois, tout le carbone contenu dans le sol — racines, microorganismes… — est émis en quelques années dans l'atmosphère quand on élimine la partie aérienne de la végétation en place.*

2.4.1. Le CO_2

À partir de 1958, la concentration atmosphérique du CO_2 atmosphérique a été mise en évidence par des mesures systématiques en un lieu éloigné de toute source humaine de pollution, à Hawaï, mettant en évidence l'accumulation de ce gaz. Non seulement les émissions n'ont pas cessé, mais elles ont même vu leur volume augmenter au fil des années, accroissant l'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère.

2.4.2. Le méthane

La concentration atmosphérique du méthane s'accroît aussi beaucoup. Après s'être quasiment stabilisée pendant quelques années au début du XXIème siècle, elle a recommencé à augmenter à un rythme soutenu. L'homme est responsable de trois des sources de ce gaz :

- d'une part l'élevage de ruminants, dont le cheptel mondial s'est fortement accru ;
- les fuites sur les sites d'extraction du gaz naturel et du charbon (les mines renferment du méthane) et dans les réseaux de transport du gaz naturel ;
- la fermentation des déchets.

2.4.3. Le protoxyde d'azote

L'oxyde nitreux d'origine humaine est essentiellement émis par oxydation des engrais azotés. Son taux annuel d'accumulation dans l'atmosphère est à peu près constant.

2.4.4. Les gaz industriels

Ce sont des gaz produits par l'industrie pour leur stabilité chimique et leurs propriétés physiques très utiles pour les domaines où ils sont appliqués. Ainsi, par exemple, l'hexafluorure de soufre (SF6), un gaz, est un isolant électrique très supérieur à l'air, très utilisé dans les dispositifs électriques à haute tension. Les fréons (chlorofluorocarbures CFC) qui sont des gaz à effet de serre ont été interdits par le protocole de Montréal en 1985 pour protéger la couche d'ozone stratosphérique qui protège la Terre des rayons ultraviolets les plus nocifs.

Malheureusement, les produits utilisés pour les remplacer ont un effet de serre beaucoup plus puissant que les fréons. Ces gaz industriels ont, du fait de leur stabilité, un temps de séjour dans l'atmosphère très long, couplé à un pouvoir de réchauffement global élevé. Heureusement, leur concentration dans l'atmosphère est très faible.

2.4.5. La conjonction de l'ensemble des gaz à effet de serre

Le bilan en équivalent de CO_2 est représenté en bas à droite sur la figure 4. On y retrouve le fait que si le CO_2 est le principal responsable de l'effet de serre additionnel, l'effet des autres gaz est significatif. La lutte contre le réchauffement impose donc de réduire les émissions des autres gaz à effet de serre et, comme le montre le diagramme de l'effet de serre additionnel, particulièrement du méthane.

2.5. C'EST L'EFFET DE SERRE QUI RÉCHAUFFE LA BASSE ATMOSPHÈRE, PAS LES GES EUX-MÊMES

L'effet de serre réchauffe la basse atmosphère et donc la surface du globe. Comme indiqué au paragraphe 1.2, l'effet de serre piège une partie de la chaleur qui nous vient du soleil. En eux-mêmes, les gaz à effet de serre n'apportent pas de chaleur. Ils agissent comme une couette sur un lit. Ce qui chauffe le lit, c'est la chaleur apportée par ses occupants. La couette empêche une partie de cette chaleur de sortir. Plus on met de couettes, moins il y a de chaleur qui sort et donc plus le lit se réchauffe si quelqu'un s'y trouve sous la pile de couettes. Mais tant que personne n'est dans le lit, sa température ne dépend pas du nombre de couettes.
Ajouter du gaz à effet de serre dans l'atmosphère, c'est comme ajouter des couettes sur le lit. Le réchauffement n'a lieu que quand il y a apport de chaleur, donc quand le soleil éclaire la zone considérée.

Le rayonnement infra-rouge ne peut partir vers l'espace que s'il est émis à une altitude telle que la quantité de GES au-dessus du point d'émission ne suffit pas à l'absorber. Si on augmente la quantité de GES, il faut que le point démission au sein de l'atmosphère soit à une altitude plus élevée pour que cette condition soit remplie. Mais la température de l'atmosphère baisse avec l'altitude (entre 7 et 10 °C par km) ; et la quantité de rayonnement émis baisse rapidement quand la température baisse. Si toute l'atmosphère ne se réchauffait pas, la condition d'égalité entre l'énergie arrivant sur Terre et l'énergie sortant vers l'espace ne serait plus réalisée.

Il en résulterait un déficit d'énergie sortante et donc un piégeage accru d'énergie dans l'atmosphère, et donc finalement un accroissement de la température de l'atmosphère jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint entre l'énergie reçue par la Terre et l'énergie sortant vers l'espace.

3. L'EFFET DE SERRE ET SON RÔLE CLIMATIQUE ÉLUCIDÉS DÈS LE XIXÈME SIÈCLE

La découverte de l'effet de serre remonte aux années 1820. L'identification des gaz en jeu et la mesure de leur absorption des infrarouges se sont faites dans les décennies qui ont suivi. La fin du siècle a vu le premier calcul de l'effet d'un accroissement du CO_2 sur le climat global.

À partir des années 1950, la multiplication d'observations de qualité, et l'utilisation d'ordinateurs ont permis des calculs précis de l'effet de l'augmentation du CO_2 et des autres GES sur le climat.
L'annexe 1 donne quelques jalons déterminants dans la découverte de l'effet de serre et la quantification de son action sur le climat.

4. L'EFFET DE SERRE ENTRAÎNE BIEN PLUS QU'UN RÉCHAUFFEMENT

L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a entraîné un accroissement de la température à la surface du globe détaillé sur carte du monde de la figure 5. L'évolution de la température globale moyenne est portée sur la partie gauche de la figure 5. Comme le montrent ces figures, le réchauffement n'est ni parfaitement régulier dans le temps, ni uniforme géographiquement.

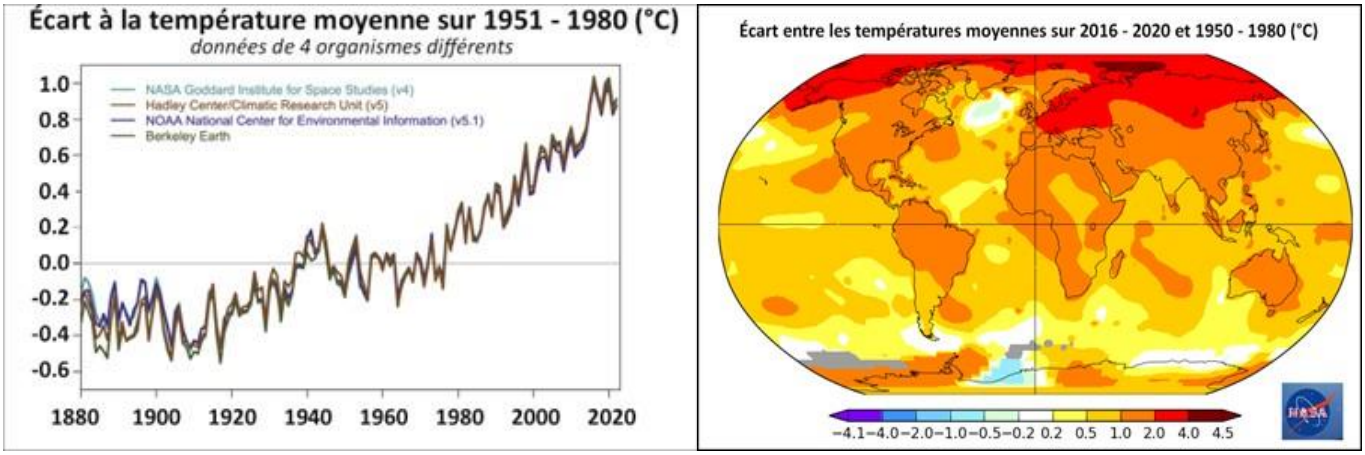

Figure 5 *– À gauche : évolution de la température moyenne globale au cours des 4 dernières décennies (à gauche). À droite : carte du réchauffement à la surface du globe entre la moyenne de la période 1950-1980 et celle de la période 2016 – 2020 (absence de données pour les zones en gris).*

Le climat de la Terre a ses variations propres, indépendamment de l'action de l'homme. L'évolution de la température qu'on mesure est la somme du réchauffement dû à l'accroissement de l'effet de serre et des variations internes du climat. Ainsi, le réchauffement dû à l'homme peut être passagèrement exacerbé par une fluctuation chaude (due par exemple à El Niño) ou réduit par un autre phénomène (La Niña ou une éruption volcanique par exemple).

Le réchauffement est plus élevé sur les continents que sur l'océan, plus élevé aux hautes latitudes surtout dans l'hémisphère nord. Quelques zones océaniques accusent un refroidissement, conséquence du réchauffement global comme on le verra ci-dessous.

4.1. CONSÉQUENCES DU RÉCHAUFFEMENT

Le réchauffement a des effets, souvent en cascade, sur de nombreuses composantes du climat et de l'environnement. Au début des années 2020, nombre de ces effets sont déjà bien présents. Le monde connait des évènements météorologiques intenses qui auparavant étaient considérés comme exceptionnels : périodes chaudes anormalement longues, occurrence de longues périodes de sécheresse aboutissant à des incendies de forêt considérables, épisodes de fortes pluies avec des cumuls de précipitation catastrophiques, accroissement de la puissance des ouragans…

Outre ces phénomènes météorologiques, on doit aussi mentionner l'élévation croissante du niveau de la mer, la réduction considérable et complètent inédite de la banquise antarctique. Sur quelques exemples, les deux paragraphes suivants montrent comment le réchauffement peut conduit à de tels phénomènes.

4.1.1. Une rétroaction de l'océan

Le réchauffement ne concerne pas que l'atmosphère, mais aussi bien sûr l'océan qui stocke 90 % de la chaleur en excès due à l'effet de serre. La mer se réchauffant, elle se dilate, ce qui fait monter son niveau.

Un effet météorologique du réchauffement de l'eau est d'augmenter l'évaporation à l'interface eau-atmosphère. L'atmosphère ayant sa température augmentée peut, contenir davantage de vapeur d'eau, conformément aux lois de la thermodynamique. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, cet accroissement de la vapeur d'eau atmosphérique renforce le réchauffement.

On est en présence d'un phénomène de rétroaction[3]. Cette vapeur d'eau supplémentaire dans l'atmosphère va y séjourner une quinzaine de jours avant de se condenser et retomber à la surface du globe sous forme de précipitations. Plus de vapeur d'eau signifie donc plus de précipitations.

4.1.2. Des effets de la fonte des glaces

Une autre conséquence du réchauffement est la fonte de la neige et des glaces, tant les glaces polaires que les glaciers alpins. Un effet évident de la fonte des glaces continentales polaires est l'accroissement de la quantité d'eau dans l'océan, faisant monter le niveau de la mer. Cet apport d'eau est devenu la cause principale de cette montée.

Les banquises polaires sont aussi affectées par la fonte. Or la surface d'eau de mer libérée de sa glace absorbe jusqu'à 10 fois plus de rayonnement solaire que la glace, très réfléchissante. Plus de rayonnement absorbé entraîne plus de réchauffement. On a là aussi une rétroaction positive.

L'eau de mer expulse son sel en se congelant, ainsi, la glace de la banquise n'est pas salée. L'eau résultant de la fonte de la glace est de l'eau douce. L'apport d'eau douce à l'océan fait diminuer localement la salinité de l'eau de mer. La salinité joue un rôle important dans le fonctionnement de grands courants marins. Ainsi cette diminution affecte la circulation océanique qui assure les échanges de chaleur entre les 2 hémisphères dans l'Atlantique. Cela est une cause possible du léger refroidissement à la surface de l'océan qu'on peut observer dans l'Atlantique Nord. Et ces modifications de la circulation océanique et des transferts de chaleur entre hémisphères induisent des perturbations dans tout le système mondial des vents.

5. QUE FAIRE FACE À CE RÉCHAUFFEMENT

Les phénomènes évoqués dans le chapitre précédent ont des conséquences souvent délétères sur notre environnement et nos conditions de vie. Pour assurer notre avenir et celui de nos enfants, il faut agir pour limiter ce réchauffement. Pour ce faire, il faut en réduire les causes et donc diminuer nos émissions de gaz à effet de serre. L'urgence est de réduire considérablement nos émissions de CO_2, mais aussi nos émissions de méthane. Compte tenu de son temps de résidence atmosphérique beaucoup plus court, la réduction du méthane a un effet important dans les premières décennies après cette réduction. Pour un terme plus long, il est essentiel de réduire les émissions de CO_2.

Pour réduire les émissions de CO_2 il faut abandonner l'utilisation des combustibles fossiles, ce qui implique de développer massivement la production non carbonée d'énergie. Mais pour assurer le bien-être de l'humanité, il importe de développer simultanément les adaptations pour limiter les effets délétères déjà bien présents et à venir du réchauffement.

[3] *On parle de rétroaction quand le phénomène primaire est renforcé (rétroaction positive) ou réduit (rétroaction négative) par le phénomène secondaire qu'il produit.*

Annexe 1 - QUELQUES JALONS DANS L'HISTOIRE DE L'EFFET DE SERRE

Les premiers travaux se rapportant à ce qu'on allait appeler l'effet de serre datent de la première moitié du XIXème siècle. Joseph Fourrier a compris la base du climat et des saisons : « *La Terre est ainsi plongée dans la température du ciel planétaire mais elle est échauffée par les rayons solaires dont l'inégale distribution produit la diversité des climats. Tous les effets terrestres de la chaleur du Soleil sont modifiés par l'interposition de l'atmosphère et la présence de l'océan. Les grands mouvements de ces fluides rendent la distribution des températures plus uniforme* ».

En 1824 il expose le principe de base de l'effet de serre : « *La température de la surface terrestre est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air, lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure* ». Ce que Fourrier appelait chaleur obscure est ce que nous appelons rayonnement infrarouge.

Dans les décennies qui ont suivi, les gaz responsables de l'effet de serre ont été identifiés et leur pouvoir d'absorption des infrarouges mesuré en particulier par l'Irlandais John Tyndall qui a bien identifié le rôle climatique de la vapeur d'eau.

À la fin du siècle, le Suédois Arrhenius a calculé — « *travail long et fastidieux* » avec les moyens de l'époque — l'effet qu'un doublement de la concentration du CO_2 aurait sur la température à la surface du globe. Il aboutit à un réchauffement global de 5 °C, maximal aux pôles. Compte tenu de l'utilisation du charbon à l'époque, il en a déduit que la température à la surface du globe augmenterait sensiblement dans les siècles à venir.

La première moitié du XXème siècle a vu peu d'avancées dans ce domaine ; les résultats d'Arrhenius ont donné lieu à quelques polémiques. Les années 1950 ont vu des progrès majeurs :

- l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère a été mise en évidence par les mesures, à Hawaï, poursuivies continûment depuis lors ;
- la mesure de la composition isotopique du CO_2 atmosphérique a mis en évidence un taux croissant de carbone d'origine fossile ;
- l'avènement des ordinateurs a permis un calcul exact de l'effet du CO_2 sur la transmission de l'énergie par rayonnement infrarouge au sein de l'atmosphère.

Pour les spécialistes, il ne faisait plus de doute que l'accumulation du dioxyde de carbone allait provoquer un réchauffement à la surface du globe, dont les conséquences pouvaient être fâcheuses. Les scientifiques ont lancé les premières alertes au grand public.

En 1967, le Japonais Wanabe a élaboré le premier modèle numérique du climat de la Terre, pour lequel il a reçu le prix Nobel de physique en 2023. Le réchauffement que nous observons est très proche des résultats de ce modèle.

En 1988 a été fondé le Groupe international d'experts sur le changement climatique (GIEC) dont la mission est de fournir aux gouvernements à tous les niveaux les informations nécessaires pour le développement de politiques du climat.