

PROBLÉMATIQUE ACTUELLE

Ce document est un extrait du tome 2 du livre Systèmes Energétiques, publié aux Presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Augmentation de l'effet de serre planétaire

À l'instar du mécanisme utilisé dans une serre ou dans un capteur solaire thermique, on appelle **effet de serre planétaire** l'influence de l'atmosphère sur l'équilibre radiatif de la terre par le biais de l'absorption du rayonnement infrarouge émis de la terre vers l'espace.

L'effet de serre est dû aux gaz contenus dans l'atmosphère, qui absorbent une partie du rayonnement incident. Les gaz présentent des raies d'absorption correspondant à des longueurs d'onde diverses. Le diagramme de la figure 1.3 donne une indication schématique de l'effet de l'absorption par le CO₂ du flux radiatif de grande longueur d'onde émis par la terre, et met en évidence l'absorption par deux raies, centrées sur les longueurs d'onde $\lambda_1 = 4,5 \mu\text{m}$, et $\lambda_2 = 14,5 \mu\text{m}$. Le rayonnement solaire incident de courte longueur d'onde (visible 0,4 - 0,8 μm) est presque intégralement transmis par l'atmosphère, puis absorbé à la surface de la terre, qui s'échauffe et réémet vers l'espace à 4 K un rayonnement de grande longueur d'onde (infrarouge 0,8 - 100 μm), dont une partie de plus en plus importante est absorbée par les gaz à effet de serre. Leur concentration ayant augmenté au cours des dernières décennies, un réchauffement progressif de la planète a été observé et pourrait conduire à des modifications importantes du climat.

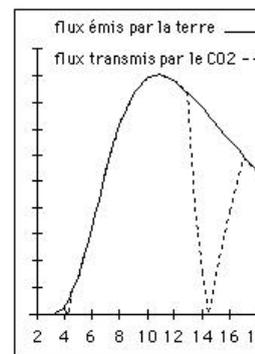


Figure 1.3

Les gaz à effet de serre sont émis par de nombreuses activités humaines (transports, chauffage, réfrigération, industrie, élevage, déchets...), et notamment par la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui produit du CO₂ demeurant en moyenne plus d'un siècle dans l'atmosphère avant d'être recyclé dans des "puits à carbone" comme la végétation. Les principaux gaz absorbants dans l'infrarouge sont la vapeur d'eau H₂O, le gaz carbonique CO₂, le méthane CH₄, le protoxyde d'azote N₂O, les chlorofluorocarbones (CFC R11 et R12 notamment) et certains gaz rares. Leurs contributions à l'augmentation de l'effet de serre sont très variables (50 % pour le CO₂, 15 % pour le CH₄, 9 % pour le N₂O), et dépendent de leur concentration, un phénomène de saturation se manifestant au-delà d'un certain seuil qui explique que les variations de concentration de la vapeur d'eau n'aient pas d'impact sensible sur l'effet de serre, bien que ce soit le gaz le plus absorbant vis-à-vis du rayonnement.

Tous les modèles prévoient que les émissions de gaz à effet de serre continueront d'augmenter fortement dans le proche avenir, comme elles l'ont fait au cours des dernières décennies, et que leur concentration atmosphérique croîtra. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère est ainsi passée de 280 ppm à 360 ppm en un siècle, alors qu'elle n'était pas sortie d'une fourchette de 170 ppm à 280 ppm au cours des 200 000 années précédentes.

La communauté internationale a réagi en créant en 1988 le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dans le cadre du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Le GIEC est chargé d'évaluer les données scientifiques disponibles sur l'évolution du climat, d'en apprécier les incidences écologiques et socio-économiques, et de proposer des stratégies de prévention et d'adaptation.

Les rapports du GIEC confirment l'influence climatique des gaz à effet de serre, déjà mise en évidence par de nombreuses anomalies statistiques récentes, comme le phénomène d'El Niño qui a causé des sécheresses et des inondations inhabituelles en Amérique Latine. Les scientifiques ont établi que les gaz à effet de serre sont responsables d'une augmentation de 0,3 à 0,6 °C de la température moyenne à la surface de la terre depuis l'ère préindustrielle, qui a été en partie occultée par l'inertie thermique des océans et par la présence croissante d'aéro

dans l'atmosphère. On estime que la température moyenne à la surface de la terre pourrait s'accroître encore de 1 à 3,5 °C d'ici 2100, ce qui se traduira par une élévation de 15 à 95 cm du niveau de la mer. Sans que l'on sache très bien quelles seront les conséquences climatiques locales de l'augmentation de l'effet de serre, les experts du GIEC considèrent que des perturbations importantes sont inéluctables, avec augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles (sécheresses, inondations, tempêtes, cyclones).

La convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique a été ratifiée en 1992 à la suite du sommet de Rio de Janeiro. Dans le cadre de cette convention, entrée en vigueur le 21 mars 1994, les pays de l'OCDE, l'UE et la Russie se sont engagés à stabiliser le volume de leurs émissions de gaz à effet de serre en l'an 2000 au même niveau qu'en 1990. En décembre 1997, au Sommet de Kyoto, ces engagements ont été prolongés pour la période 2008 - 2012 : les pays industrialisés se sont en moyenne engagés à réduire de 5,2 % leurs émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008 - 2012 par rapport à 1990, l'Union européenne s'engageant pour sa part à réduire ses émissions de 8 %. Dans le cadre d'un accord interne à l'Union européenne, la France doit stabiliser ses émissions (objectif 0 %).

Malgré tous les travaux réalisés depuis une vingtaine d'années pour mieux comprendre les mécanismes de l'effet de serre, de nombreuses inconnues existent encore, du fait :

- des interactions entre les nuages, les océans, et les calottes glaciaires polaires ;
- de la taille et de la nature des sources et des puits de CO₂.

En revanche, la part dans le réchauffement de la planète des différents gaz d'origine humaine, quelquefois appelé "forçage radiatif" est mieux connue. Pour évaluer la nocivité d'un gaz en terme d'effet de serre on utilise un indice nommé en français Potentiel d'Action sur l'Effet de Serre (PAES), plus connu sous son nom anglais *Global Warming Potential* (GWP). Il représente la capacité relative d'un gaz à effet de serre de participer au forçage radiatif, et va de 1 pour le CO₂.

La contribution d'un gaz à l'effet de serre dépend d'une part de la quantité de ses émissions, et d'autre part de plusieurs facteurs pris en compte dans le calcul du GWP : ses propriétés d'absorption dans l'infrarouge et son temps de séjour dans l'atmosphère. Ce dernier facteur étant très variable d'un gaz à l'autre (plusieurs centaines d'années pour le méthane CH₄), il est nécessaire de s'accorder sur un horizon temporel d'intégration (HTI) approprié. Les GWP peuvent alors être déterminés en calculant le forçage radiatif cumulé sur le HTI choisi. Le GIEC a ainsi fait des évaluations des GWP sur des HTI de 20, 100 et 500 ans. Comme les chiffres présentés dans les publications correspondent généralement à un HTI d'un siècle, nous retiendrons cette valeur dans ce livre.

Amélioration des rendements

Stabiliser la concentration de CO₂ dans l'atmosphère demandera des efforts considérables, du fait de l'inertie de ces phénomènes en jeu et du temps de séjour des gaz dans l'atmosphère.

Alors qu'à la suite du contre-choc pétrolier de 1973 un certain relâchement avait été perceptible dans la recherche de meilleures efficacités pour les technologies énergétiques, l'amélioration des rendements de tous les moteurs est redevenue un objectif principal des constructeurs, l'objectif étant cette fois de réduire la masse de CO₂ émise par kWh produit... Nous y reviendrons dans presque tous les chapitres de ce tome.

Piégeage du CO₂

Près de 90 % du bilan énergétique mondial étant assuré par les combustibles fossiles, l'émission de gaz carbonés apparaît comme un produit fatal pour lequel il n'existe pas aujourd'hui de solution alternative.

De la même manière, on ne voit pas très bien comment augmenter le pouvoir de captation en CO₂ de la terre, les projets de reforestation à grande échelle se heurtant tous à de nombreuses contraintes techniques et socioculturelles. C'est pourquoi il est de plus en plus sérieusement envisagé de piéger le CO₂, au moins dans les unités de forte capacité et fixes, puis de le stocker dans des stockages souterrains ou au fond des océans.

Diminution de la couche d'ozone

Depuis la mise en évidence expérimentale par des chercheurs anglais et japonais, en 1985, d'un trou indubitable dans la **couche d'ozone** sur l'antarctique au moment du printemps austral (diminution de moitié aux deux tiers de l'épaisseur normale), la communauté internationale s'est particulièrement mobilisée. La rupture de la couche d'ozone est imputable à de nombreux gaz, dont ceux qui contiennent du chlore, et dont l'usage était à l'époque pour 60% directement lié à des applications énergétiques : production des isolants thermiques en mousse expansée, utilisation comme fluides frigorigènes dans les installations de climatisation et de réfrigération.

Conscients de l'impact négatif sur l'environnement des chlorofluorocarbones (CFC), les producteurs industriels ont mené des programmes de recherche importants pour mettre au point des substituts. Deux grandes classes de produits ont principalement été étudiées : les hydrochlorofluorocarbones (HCFC), et les hydrofluorocarbones (HFC). Les HCFC sont des molécules proches des CFC, certaines liaisons chlore étant remplacées par des liaisons hydrogène tandis que les HFC n'ont plus aucun atome de chlore. La stabilité des molécules HCFC étant beaucoup plus faible que celle des CFC, elles sont très largement détruites dans les basses couches atmosphériques, et seule une faible fraction des atomes de chlore qu'elles contiennent se retrouve dans la stratosphère, rendant ainsi ces molécules beaucoup moins nocives pour la couche d'ozone.

Toutefois, la réduction de leur potentiel de destruction de l'ozone s'accompagne d'une modification de leurs caractéristiques techniques, ce qui induit la remise en cause de bon nombre des solutions technologiques antérieures et pose de nombreux défis à l'industrie de la réfrigération et de la climatisation.

Le premier accord international conclu en la matière est le **Protocole de Montréal**, qui a pris effet début 1989, décidant de la réduction de la consommation des CFC au niveau de 1986, suivi d'une réduction de 20 % en 1991 et d'une deuxième réduction de 30 % en 1999. Le mouvement s'est ensuite poursuivi, et, dès 1990, à Londres, a été entériné par un Amendement conduisant à une accélération du processus, avec l'objectif d'un bannissement pur et simple à partir de l'an 2000, pour tous les CFC et les halons, et une remise en cause des HCFC, du fait qu'ils contiennent toujours du chlore.

Le règlement de la Commission Européenne de mars 1991 prévoyait l'arrêt de la production et de la consommation des CFC le 1er juin 1997. En novembre 1992, à Copenhague, un nouvel Amendement avançait encore cette date au 1er janvier 1996.

À l'instar de ce qui est fait pour les gaz à effet de serre, l'évaluation de la nocivité d'un gaz en terme de destruction de la couche d'ozone est effectuée en utilisant un indice nommé en français Potentiel d'Appauvrissement de l'Ozone Stratosphérique (PAOS), plus connu sous son nom anglais d'*Ozone Depletion Potential* (ODP). Cet indice varie de 0 à 1 pour le CFC 11.

Cette problématique concerne principalement l'industrie de la réfrigération, comme nous allons le voir maintenant.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES FRIGORIGENES

Les premiers cycles de réfrigération qui ont été réalisés vers 1875 utilisaient des fluides comme l'ammoniac, le dioxyde de soufre ou le gaz carbonique. Par la suite, dans la première moitié du XX^e siècle sont apparus de nouveaux fluides dérivés chlorofluorés du méthane et de l'éthane (les chlorofluorocarbones CFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC). Pour des raisons multiples, tant techniques (performances thermodynamiques, compatibilité avec les huiles, joints, métaux, pressions acceptables...) que d'acceptabilité sociale (faible inflammabilité et toxicité), ces fluides ont progressivement pris la place des précédents, à l'exception de l'ammoniac, toujours utilisé dans les installations industrielles, notamment agroalimentaires.

La dénomination commerciale des CFC suit la convention suivante : il s'agit d'un numéro à deux ou trois chiffres. Celui des centaines, lorsqu'il existe, est égal au nombre d'atomes de carbone, moins une unité. Celui des dizaines est égal au nombre d'atomes d'hydrogène augmenté d'une unité, et le chiffre des unités est égal au nombre d'atomes de fluor.

Le reste de la molécule est constitué d'atomes de chlore, sauf si elle comporte du brome, auquel cas le numéro suivi de la lettre B et du nombre d'atomes de brome : par exemple, le R 125 a pour formule chimique C₂HF₅Cl₂B₂ a pour formule chimique C₂F₄B₂Cl₂.

ARRÊT DE LA PRODUCTION DES CFC

En quelques décennies, un CFC et un HCFC, le R12 (CCl₂F₂) et le R22 (CHClCF₂), en sont venus à représenter eux seuls 75 % du parc de réfrigération français (en 1998), tandis que l'ensemble des nouveaux fluides dépassait 25 % du total.

Deux préoccupations environnementales sont venues brusquement remettre en cause l'utilisation massive de ces fluides : la rupture de la couche d'ozone et l'augmentation de l'effet de serre. Très rapidement a été prise la décision d'arrêter la production des CFC et des halons, et de remettre en cause celle des HCFC, du fait qu'ils contiennent toujours du chlore. L'ensemble de ces mesures a provoqué pour les industriels de la réfrigération une révolution technologique majeure qui a commencé en 1994 et qui n'est pas terminée.

Les problèmes se posent différemment selon qu'il s'agit de concevoir une nouvelle installation ou de changer un fluide d'une existante. Dans ce dernier cas, il est nécessaire que les caractéristiques thermodynamiques du fluide de remplacement soient proches de celles de l'original, alors que dans le premier cas le changement peut quelquefois permettre une amélioration des performances de l'installation. Dans tous les cas, de nombreux problèmes technologiques doivent être étudiés, comme par exemple la compatibilité avec les lubrifiants, le choix du compresseur, l'adaptation du détendeur...

Pour compliquer les choses, les réglementations diffèrent selon les pays, en fonction des engagements auxquels ils ont souscrit dans le cadre des accords internationaux. Un dernier élément à prendre en compte est que de grandes incertitudes subsistent pour l'avenir, notamment en ce qui concerne le sort des HFC à GWP important.

FLUIDES DE SUBSTITUTION

Dans le cadre de cet ouvrage, il n'est pas possible de passer en revue l'ensemble des options et des contraintes existant sur la problématique du remplacement des fluides frigorigènes. Nous nous contenterons donc d'en faire une présentation assez générale, renvoyant à la littérature spécialisée le lecteur intéressé par de plus amples développements.

Rappelons que l'évaluation de la nocivité d'un gaz pour l'environnement global peut être estimée de la manière suivante :

- en terme de destruction de la couche d'ozone, grâce à un indice surtout connu sous son nom anglais d'*Ozone Depletion Potential* (ODP), dont la valeur est égale à 1 pour le R11 ;
- en terme d'effet de serre en utilisant un indice appelé en anglais *Global Warming Potential* (GWP), qui vaut 1 pour le CO₂ et dont le calcul suppose le choix d'un Horizon Temporel d'Intégration, généralement choisi à 100 ans.

Pour une technologie complexe comme celles qui sont utilisées pour la réfrigération, ce dernier indice ne suffit pas car d'une part les frigorigènes ne sont en principe pas directement relâchés dans l'atmosphère, et d'autre part il existe un effet indirect qui est dû aux émissions de CO₂ correspondant à l'énergie consommée par l'installation pendant sa durée de vie, qui dépendent elles-mêmes de la structure du parc de production électrique national. On a donc créé un autre indice, appelé Effet de Serre Equivalent Total (ESET), plus connu sous son nom anglais de *Total Equivalent Warming Impact* (TEWI).

Le TEWI prend en compte selon l'équation (9.1.1) l'impact direct basé sur la charge de frigorigène m , les fuites de gaz pendant la durée de vie n (pourcentage annuel f), et lors de la fin de vie de la machine (facteur de recyclage β) l'impact indirect dû à la consommation d'énergie E .

$$TEWI = GWP \cdot f \cdot m \cdot n + GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha) + n \cdot E \cdot \beta \quad (9.1.1)$$

Pour fixer les idées, $f \approx 5 - 10 \%$, $\alpha \approx 0,5$, $n \approx 15$ ans, $\beta \approx 0,1$ kg/kWh pour la France, et $\beta \approx 0,55$ kg/kWh l'Europe, la différence s'expliquant par l'importance du parc électronucléaire français.

Le mode de calcul de l'équation (9.1.1) peut paraître un peu complexe, mais il permet de comparer des technnc très différentes et de comptabiliser à la fois les effets directs et indirects. Comme le montre cette relation, la valeur du TEWI peut être diminuée en réduisant la charge en frigorigène des installations (m) et en renforçant leur confinement (f), ce qui justifie que des efforts importants soient faits en ce sens par les fabricants.

On peut regrouper les fluides de remplacement des CFC en trois grandes catégories : les fluides de transition, les fluides à ODP nul, et les fluides à ODP nul et faible GWP.

Dérivés halogénés de transition

La solution la plus immédiate pour chercher des fluides de remplacement aux CFC a été de travailler sur les hydrochlorofluorocarbones (HCFC), a priori relativement proches sur le plan chimique, et moins nocifs pour la couche d'ozone. Toutefois, ces fluides à ODP non nul sont soit déjà tous interdits, soit le seront prochainement par les pays signataires du Protocole de Montréal et des accords qui l'ont suivi, de telle sorte qu'ils ne constituent pas une solution à court terme, d'où leur appellation de fluides de transition. Les fluides de cette famille sont le R22, le R124 et le R142b pour les corps purs, ainsi que des mélanges, principalement basés sur le R22.

Dérivés halogénés à ODP nul

Sur le plus long terme, les seuls dérivés halogénés acceptables vis-à-vis de la couche d'ozone sont les hydrofluorocarbones (HFC), qui, ne contenant pas d'atomes de chlore, ont un ODP nul. Les fluides de cette famille sont le R134a, le R125, le R32 et le R143a pour les corps purs, ainsi que leurs mélanges.

Le R134a en particulier a réussi à s'imposer en quelques années comme une solution alternative pour un assez grand nombre d'installations. Ses propriétés thermodynamiques sont très proches de celles du R12, qu'il peut remplacer dans de nombreuses applications, mais il se révèle aussi une alternative appropriée pour diverses utilisations auparavant réservées au R22, moyennant cependant un certain nombre de modifications technologiques (notamment une cylindrée de compresseur plus importante).

Le principal inconvénient que présentent ces fluides est que, si leur ODP est nul, leur GWP est très élevé (1300 pour le R134a, 3200 pour le R125, 580 pour le R32, 4400 pour le R143a), et que leurs molécules, très stables, ont des durées de vie atmosphérique de plusieurs dizaines voire centaines d'années. Leur contribution à l'effet de serre est donc potentiellement importante, et leur production est à ce titre susceptible d'être remise en cause à plus ou moins brève échéance.

Fluides à ODP nul et faible GWP

Les seuls fluides de substitution sans inconvénient vis-à-vis de la couche d'ozone et de l'effet de serre sont les fluides non halogénés comme l'ammoniac (R717), le propane (R290), l'isobutane (R600a), le gaz carbonique (R744) (R818).

Les trois premiers présentent des contraintes d'inflammabilité (ainsi que de toxicité et de compatibilité avec certains métaux comme le cuivre pour le premier) qui en limitent de fait l'utilisation. Le dernier ne peut être employé pour obtenir des températures négatives, et les cycles au R744 ont aujourd'hui des efficacités nettement plus faibles que les autres.

L'ammoniac, le butane et le propane ayant de très bonnes caractéristiques thermodynamiques, ils constituent cependant des alternatives très sérieuses, et leur usage s'est sensiblement développé au cours des dernières années. 100 % du marché européen des réfrigérateurs domestiques utilise aujourd'hui du butane, notamment en Europe du Nord. Malgré ses performances relativement faibles et les hautes pressions qu'il demande, le gaz carbonique est étudié comme fluide pour les installations de climatisation automobile, où les risques de fuite sont élevés et remettent en cause l'utilisation du R134a à fort GWP.

Mélanges

Dans les paragraphes précédents, nous avons mentionné à plusieurs reprises l'utilisation possible de mélanges fluides de substitution. Les fabricants de fluides frigorigènes considèrent en effet qu'à l'exception du R134a, il est maintenant peu probable de trouver des fluides purs qui possèdent des propriétés thermodynamiques leur permettant d'être de parfaits substituts aux anciens fluides. En revanche, en mélangeant des fluides purs dans des proportions bien choisies, il est possible d'obtenir des caractéristiques mieux adaptées, ce qui explique l'intérêt que suscite les mélanges.

Le comportement des mélanges en équilibre liquide-vapeur est cependant généralement différent de celui des fluides purs, le titre de chacun des constituants évoluant entre des limites qui dépendent de la pression et de la température du fait de la distillation qui prend alors place.