Les textes présentés ci-dessous sont des réponses au dossier sur l'environnement paru dans L'Actualité Chimique de janvier-février 1993. Ils tiendront lieu de courrier des lecteurs pour ce numéro.

Le climat et la couche d'ozone

C'est avec intérêt que j'ai lu en page 37 du numéro de janvier/février de *L'Actualité Chimique* votre appel aux lecteurs concernant un certain nombre de questions présentées comme mal résolues par les recherches menées actuellement dans le domaine de l'évolution du climat et celui de la couche d'ozone stratosphérique.

En tant qu'ancien président du comité scientifique du programme Atmosphère Moyenne (programme d'étude de la stratosphère et de la couche d'ozone, mis en place par le CNES, le CNRS et le ministère de l'Environnement) et actuellement responsable des recherches dans le domaine du climat à Météo-France, j'aimerais apporter ma contribution au débat que vous avez ainsi ouvert dans vos colonnes. Je m'efforcerai donc de répondre point par point aux interrogations de votre "questionneur" en indiquant si besoin est des références précises permettant au lecteur intéressé d'approfondir les questions traitées.

Effet de serre

A. L'analyse des carottes polaires nous apprend effectivement que dans un passé lointain, entre - 20 et - 160 milliers d'années, la température moyenne de la Terre et la concentration du gaz carbonique ont évolué parallèlement. Il ne faut pas directement en déduire, et en particulier aucun des scientifiques qui ont publié ces résultats ([1], chapitre 1) ne l'ont fait, que c'est l'accroissement du gaz carbonique qui fut la cause de l'augmentation de température. Cependant, si l'on fait le rapport entre les variations de température et celles de la concentration de gaz carbonique, on obtient une valeur cohérente avec la sensibilité déduite des modèles prédictifs actuels, entre 1 et 4 °C de réchauffement pour un doublement de la concentration du CO_2 [2].
Les observations du passé sont donc compatibles avec ce que l'on peut prévoir de l'augmentation de l'effet de serre et de son effet sur les températures lorsque le gaz carbonique augmente. Ce n'est donc pas une preuve, mais à l'inverse si des périodes froides avaient été associées à de fortes valeurs du CO_2, alors la théorie de l'augmentation de l'effet de serre dû à l'accroissement de CO_2 serait mise en défaut. C'est ce qui fait tout l'intérêt de ces mesures, et c'est pourquoi les scientifiques développent des programmes importants de carottage afin de couvrir une large plage d'évolution temporelle et de mesurer la concentration des autres gaz pouvant également contribuer à l'effet de serre (ES), CH_4 et N_2O notamment.

B. Il est tout à fait inexact de dire que le problème de l'accroissement de l'ES est traité sans prendre en compte celui de la vapeur d'eau. Bien au contraire, les modèles climatiques que nous utilisons sont sensibles à l'augmentation du gaz carbonique du fait d'une rétroaction positive existant entre la température de l'air et son contenu en vapeur d'eau. Lorsque l'air s'échauffe, l'évaporation à la surface des océans augmente, ainsi que le rapport de mélange de vapeur d'eau en altitude, ce dernier étant régulé principalement par les changement d'état vapeur-eau-glace. Lorsqu'un modèle calcule un réchauffement d'environ 2 °C pour un doublement du gaz carbonique, les 3/4 de cet effet sont dus à l'augmentation de l'humidité qui y est associée. Une des principales incertitudes dans ces processus reste la manière dont la couverture nuageuse évolue, les nuages étant très efficaces pour augmenter l'ES en piégeant le rayonnement IR montant, mais contribuant également à réfléchir vers l'espace le rayonnement reçu à leur sommet. Le bilan radiatif net d'une augmentation de la couverture nuageuse est donc encore mal connu, ces incertitudes se reflètent dans la fourchette de réchauffement obtenue par l'ensemble des modèles théoriques [2].

C. Je n'ai jamais lu dans aucun manuel que s'il n'y avait pas d'atmosphère sur Terre la température serait de - 18 °C (la température de quoi d'ailleurs ?). Par contre, ce que l'on peut lire dans les meilleurs ouvrages [3], c'est que si les processus d'absorption et de ré-émission de l'énergie dans le domaine infrarouge tellurique par les gaz et les nuages (l'effet de serre) n'existaient pas, alors la seule émission vers l'espace de ce rayonnement conduirait à une atmosphère dont la température moyenne globale serait proche de - 18°C. Il ne s'agit donc pas d'enlever à la Terre son atmosphère, mais d'évaluer la contribution de l'ES naturel au bilan radiatif de l'atmosphère.

D et **E.** L'augmentation d'environ 0,5 °C de la température depuis 1860 se base sur l'analyse des températures obtenues dans les principaux postes climatologiques. Cette analyse n'est pas facile car certains processus comme l'encerclement par les villes des postes se trouvant initialement à la campagne doivent être pris en compte. Les publications récentes ([2], chapitre C) montrent que la tendance de 0,5 °C est statistiquement significative. Il ne faut cependant pas en déduire qu'il s'agit là d'une manifestation précoce de l'effet de serre, des fluctuations naturelles de cette amplitude sur cette échelle de temps sont tout à fait possibles. On considère qu'il faudra attendre encore dix à vingt ans avant que le signal éventuel d'un réchauffement sorte du "bruit" des mesures, mais il n'y a pas unanimité sur ce point dans la communauté scientifique.

C et **F.** Il faut d'abord s'entendre sur ce que l'on appelle climat. Pour le météorologiste, le climat ne se réduit pas à l'historique des températures de l'air à la surface (dans les réseaux climatologiques la

mesure est faite à 2 m du sol) mais à l'ensemble des variables qui caractérisent les conditions thermodynamiques de l'air au sol et en altitude (température, vitesse de vent, humidité), ainsi qu'aux bilans hydrique et énergétique à la surface. Les valeurs moyennes et les fluctuations de ces paramètres font partie intégrale de la description du climat.

Dire que localement ce signal est très fluctuant ne permet pas de dire qu'un changement modeste de la valeur moyenne n'aurait aucun impact. Prenons, par exemple, le cas des sécheresses estivales récurrentes observées dans le sud du pays durant ces dernières années. Bien qu'il s'agisse sans doute d'un phénomène purement naturel, ces sécheresses répétées ont eu un impact important sur les productions agricoles et/ou les ressources en eau nécessaires à l'arrosage. Si l'on décale de + 2 °C l'historique des températures sur cette période, la situation aurait été bien plus préoccupante encore. Par contre, il est concevable qu'un tel réchauffement dans certaines régions au climat rude comme la Sibérie n'aurait pas que des effets négatifs.

En fait, il y a lieu de mener de manière globale et régionalisée les études d'impact d'un éventuel changement climatique, plusieurs secteurs sont a priori sensibles, cultures et forêts, transport et énergie, littoral, etc. [4] ; le travail a débuté sous l'égide du Groupe International d'Étude de l'Évolution des Climats (en anglais IPCC), la tâche est de grande ampleur et mobilisera dans les prochaines années de nombreux chercheurs dans les domaines concernés.

Je voudrais pour finir sur ce point faire une liste (partielle) des vraies questions et incertitudes qui demeurent, et auxquelles la communauté scientifique aimerait bien répondre :

- Quel va-t-être l'effet radiatif net des nuages, temporiser ou accroître l'ES?
- L'océan a une grande inertie thermique, quels seront l'amplitude et le délai induits par cet effet tampon dans le réchauffement climatique ?
- Seule la moitié du CO_2 émis dans l'atmosphère y demeure, le reste est absorbé par les eaux froides de l'océan ou fixé par la végétation. Comment le cycle du carbone évoluera-t-il dans le futur, notamment sous l'effet du dégazage consécutif au réchauffement de l'océan ?
- Comment pourrait évoluer la biosphère terrestre et le bilan hydrique ? L'action directe humaine (déforestation-reforestation-mise en culture) sera-t-elle plus ou moins importante que l'évolution de la biosphère induit par un réchauffement global ?

Couche d'ozone

A. Avant de discuter en détail les caractéristiques du transport des CFC dans l'atmosphère, il est bon d'en donner quelques grandeurs caractéristiques.

Dans la troposphère, depuis le sol jusqu'à environ 12-16 km, l'atmosphère est le siège de mouvements turbulents d'échelle variable. Le transport à longue distance d'un polluant inerte va donc dépendre d'abord du transport vertical dans la couche proche de la surface (la "couche limite"), puis du transport horizontal et donc de la circulation générale atmosphérique. Si la couche limite est convective, le brassage vertical d'un polluant s'effectuera en quelques heures, puis il sera entraîné par les vents soufflant préférentiellement vers l'est aux latitudes moyennes, vers l'ouest à l'équateur. Au bout d'une à deux semaines, notre polluant aura fait le tour de la Terre, au bout de plusieurs mois sa concentration se sera uniformisée dans l'hémisphère où il a été émis, au bout d'un an il atteindra l'hémisphère opposé et s'y diluera également en quelque mois. Le temps caractéristique de dilution d'un polluant est donc d'environ 2 ans dans la troposphère.

Passé ce délai, notre polluant aura atteint la limite inférieure de la stratosphère où il y sera injecté relativement lentement. Compte tenu des caractéristiques de la circulation méridienne, cette injection se fera principalement dans les zones d'ascendances équatoriales vers 16 km d'altitude. Ensuite lorsque le polluant diffusera dans la stratosphère aux latitudes moyennes, il sera transporté rapidement par la circulation zonale intense liée à la présence des tourbillons polaires d'hiver et sera brassé dans chaque hémisphère en une saison ou deux.

Le passage des CFC au niveau de la tropopause équatoriale très froide (- 60 à - 70 °C) ne peut pas conduire à leur condensation car leur concentration est bien trop faible, de l'ordre de 0,1-0,2 ppbv, si bien que, dans le diagramme d'état des CFC, le passage vapeur-liquide est interdit, on n'atteint jamais la pression de vapeur saturante [5].

En résumé, et compte tenu de ces différents processus, un polluant émis à la surface des latitudes moyennes de l'hémisphère nord mettra de l'ordre de 4 ans pour être transporté dans la basse stratosphère où sa concentration sera relativement homogène sur l'horizontale. Pour gagner des altitudes supérieures, vers 30-40 km, une dizaine d'années seront nécessaires.

C'est ce que l'on constate lorsqu'on analyse les mesures du CO_2 et du ^{85}Kr (gaz émis par les centrales nucléaires ayant une durée de vie proche de dix ans).

Dans l'atmosphère, en dessous d'une altitude de 80 km environ, les processus de transport verticaux et horizontaux sont donc dus au transport turbulent, et non pas au transport par diffusion moléculaire qui lui est inférieur de plusieurs ordres de grandeur ([6], chapitre 5). Comme le CO_2 et le ^{85}Kr, les CFC, bien que plus lourds que l'oxygène et l'azote de l'air, suivent donc le même circuit et sont donc transportés dans la stratosphère. Là ils y sont photodissociés et libèrent leurs atomes de chlore.

B et **C**. les données d'irradiation UV au niveau du sol sont publiées ([7], chapitre 11), elles montrent en particulier une augmentation significative de 22 % de l'irradiation UVB lorsque la colonne totale d'ozone décroît de 300 à moins de 260 unités Dobson.

D. La vitesse de destruction de l'ozone n'est pas une question de "longueur de chaîne", mais de vitesse de certains cycles catalytiques de destruction. Deux cycles sont particulièrement efficaces dans la stratosphère, le premier l'est vers une altitude de 40 km :

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$
$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

bilan $$O + O_3 \rightarrow 2\,O_2$$

Mais celui qui détruit actuellement l'ozone polaire met en jeu le dimère Cl_2O_2 de l'oxyde de chlore [8] :

$$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$$
$$Cl_2O_2 + UV \rightarrow Cl + ClO_2$$
$$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$$
$$2(Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2)$$

Bilan : $O + O_3 \rightarrow 2\,O_2$

E. Diverses techniques basées soit sur un dosage *in situ* (avec utilisation des ballons sondes), soit sur la propriété d'absorption des rayonnements UV et IR existent pour mesurer l'ozone atmosphérique. L'instrument Dobson réalise une mesure du rayonnement atmosphérique dans différentes bandes UV, certaines étant absorbées par l'ozone d'autres non, la colonne d'ozone est ensuite déduite de l'absorption relative du rayonnement par application de la loi de Beer-Lambert. Le satellite TOMS travaille de la même façon mais dans une géométrie différente. Dans des conditions de ciel clair hors présence de quantités importantes d'aérosols, la précision de ces mesures est de l'orde de 5 %. La difficulté d'établir une tendance de l'évolution de l'ozone ne tient donc pas à l'imprécision des mesures, mais au caractère très variable de sa concentration, par exemple au dessus d'un point la colonne totale d'ozone peut varier de plus de 100 unités Dobson en moins de 12 heures selon les conditions dynamiques de la basse stratosphère.

L'ensemble des instruments Dobson fonctionnent en réseau et des intercomparaisons fréquentes sont réalisées. Les dernières analyses ([7], chapitre 2) montrent

Dysinformation et grand public

Ce n'est qu'aujourd'hui, au retour d'un séjour à l'étranger, que j'ai eu la satisfaction de lire le numéro 1 (janvier-février 1993) de *L'Actualité Chimique* consacré essentiellement à l'Appel de Heidelberg et au "Sommet" de Rio. Je me permets de vous adresser mes très vives félicitations pour cette très intéressante mise au point : elle était nécessaire, d'autant plus que la "grande presse", comme les médias audio-visuels, comme les revues qui se prétendent scientifiques, après avoir, d'une façon ou d'une autre, minimisé, voire rejeté l'Appel ont, technique éprouvée, adopté l'étouffement par silence interposé.

Bien sûr, une revue pour chimistes professionnels ne peut pas - et ne vise nullement - à toucher un large public. Mais en l'occurrence il s'agit d'un public de premier choix, celui des chimistes (professeurs, étudiants, chercheurs et industriels), et l'impact d'un tel numéro de revue ne peut que se révéler positif, à long terme du moins.

Ce qui n'empêche pas, au contraire, de nous efforcer, chacun d'entre nous et chacun selon ses possibilités, de profiter de ce numéro de *L'Actualité Chimique* pour relancer la très grave polémique désormais en cours. Très grave car fut très grave l'escroquerie intellectuelle, politique et financière (main basse sur des milliards de dollars payés, comme toujours, par les contribuables, les consommateurs et les naïfs) dite « Sommet de Rio » et ses suites.

Car, malgré votre numéro 1 de *L'Actualité Chimique* et malgré quelques périodiques américains, malgré trois ou quatre ouvrages réduits délibérément à la confidentialité, le grand public (celui des consommateurs et celui des électeurs, public qui va de notre concierge à notre Président de la République en passant, hélas, par les ministres de l'Environnement à se succéder depuis 1988) ne connaît, de ces problèmes majeurs que sont la mise hors-la-loi, par des non-compétents s'appuyant sur des scientifiques parfois corrompus, du DDT, des PCB, des CFC, que ce que lui raconte une presse et des médias soit aux ordres, soit achetés, presse qui s'est, depuis trop longtemps, alignée sur les "deep-ecologists", américains d'abord, puis allemands et, pour finir, français.

Les menaces que représentent ces mouvements, et que Luc Ferry analyse de très intelligente façon dans son "Nouvel ordre écologique", ces menaces sont diverses, nombreuses, redoutables.

Les millions de victimes du paludisme depuis la mise hors-la-loi du DDT en 1972 vont être suivis par les millions qui seront balayées par la suppression du Freon. Or, pas plus *Le Monde* que *La Recherche*, pas plus les hebdos qui se prétendent sérieux que France-Culture ni les TV, toutes chaînes confondues, ne laissent passer à ce sujet la moindre information qui ne soit catastrophiste. Le catastrophisme, évidemment, se vend incomparablement mieux qu'une réalité apaisante et les écolos de base, par millions, achèteront toute littérature apocalyptique alors qu'ils ne consacreront pas un sou à la recherche d'une vérité d'autant plus difficile à définir que certains scientifiques et tous les politiciens ignorants donnent aux hypothèses catastrophistes un épais vernis de vérité officielle.

La démarche d'information sérieuse que vous avez entreprise dans *L'Actualité Chimique* est, de ce fait de la dysinformation générale et de sa nocivité extrême, d'importance majeure. C'est un premier pas vers la reconquête des journaux et des médias, sans lesquels il est impossible de faire savoir aux citoyens ce qui est vrai et ce qui ne l'est pas.

Mais il faut franchir le seuil qui sépare les relativement très rares spécialistes de la masse énorme des citoyens et, pour y arriver, il faut que des échos de votre numéro 1 soient rendus publics. Je pense que vous devriez l'obtenir au *Monde*, voire même à *La Recherche* ?

Haroun Tazieff
ancien ministre
président de la commission
Environnement de la région Rhône-Alpes

une très bonne cohérence spatiale et temporelle entre les diminutions d'ozone observées par ce réseau sol et le satellite TOMS.

F. Les volcans ne peuvent avoir d'influence notable dans la stratosphère que lors des éruptions explosives. En effet, en cas d'émissions proche du sol où n'atteignant pas la tropopause, les gaz solubles et les aérosols seront lessivés par les pluies avant d'être injectés dans la stratosphère. C'est le cas, notamment, de l'HCl émis qui ne peut pas dans ces conditions constituer une source significative de chlore stratosphérique.

Par contre les éruptions violentes, comme celles d'El Chichon et du Pinatubo, contribuent à la charge en aérosols de la stratosphère. Les mesures du profil vertical d'HCl, avant et juste après l'éruption du volcan El Chichon, n'ont pas montré d'augmentation notable de cette espèce, à l'échelle globale la source de chlore stratosphérique d'origine volcanique apparaît donc très inférieure aux autres sources naturelles (la décomposition du gaz CH_3Cl) et à celle des CFC.

Pour conclure, je voudrais souligner que s'il est tout à fait légitime que le grand public se pose des questions sur ces sujets, l'accusation selon laquelle la communauté scientifique ne transmettrait que des messages partiels, voire tendancieux, ne me paraît pas fondée. Pour s'en convaincre le lecteur pourra lire les rapports cités en référence ainsi que les très bons dossiers et livres publiés récemment sur le sujet ([9], [10], [11], [12]). Dans chacun de ces ouvrages y sont discutées les certitudes issues des résultats des recherches passées, mais aussi, et dans une très large part, les incertitudes qui subsistent.

La tâche des scientifiques est donc de réduire ces incertitudes, pour ce faire des moyens d'observation au sol, en mer et par satellite ainsi que la disponibilité de calculateurs puissants sont nécessaires [13]. Ces moyens ne sont pas d'un coût exorbitant par rapport à ceux déjà utilisés pour l'exploration des autres planètes du système solaire, ils sont sans doute dérisoires devant ceux qu'il faudrait mettre en place pour s'adapter et parer aux effets d'un réchauffement atmosphérique de grande ampleur, ou d'une augmentation importante du rayonnement solaire ultraviolet au sol.

D. Cariolle
Ingénieur en Chef de la Météorologie,
Météo France, Centre national
de recherches météorologiques,
Groupe de météorologie
de grande échelle et climat,
42, avenue Gustave Coriolis,
31057 Toulouse Cedex.

RÉFÉRENCES

[1] Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Ed. Cambridge University Press, **1990**.
[2] Climate Change 1992, The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, Ed. Cambridge University Press, **1992**.
[3] L'effet de serre et ses conséquences climatiques : évaluation scientifique, rapport de l'Académie des sciences, Rapport n° 25, **1990**.
[4] Gérer la Planète, *Pour La Science*, n° 145, mai **1989**.
[5] Vade-Mecum de la récupération des CFC, Ademe, Ed. Pyc, **1993**.
[6] Banks and Kockarts, Aeronomy, Part B, Academic Press, **1973**.
[7] Scientific Assessment of Ozone Depletion : 1991, WMO report n°25, **1991**.
[8] Molina and Molina. *J. Phys. Chem.*, **1987**, 91, 433.
[9] G. Mégie. Ozone, l'équilibre rompu, Presse du CNRS, **1989**.
[10] J. C. Duplessy, P. Morel, Gros temps sur la planète. Ed. Odile Jacob, **1990**.
[11] A. Berger, Le climat de la Terre, un passé pour quel avenir ? Ed. de Boeck Université, **1992**.
[12] L'effet de serre, *La Recherche*, n° 243, mai **1992**.
[13] L'évolution du climat et de l'environnement global : La contribution française en 1991, ministère de la Recherche et de la Technologie, **1991**.

Note de la Rédaction

La compétence de M. Cariolle donne à sa lettre la valeur d'une mise au point sur un texte quelque peu naïf. Celui-ci ne voulait mettre en doute ni la pertinence des études en cours, ni la conviction des spécialistes. Il tentait d'exprimer l'insatisfaction de beaucoup devant l'opacité du flot de commentaires au travers desquels il est difficile d'être convaincu du bien-fondé de décisions graves, elles-mêmes porteuses de conséquences qu'il serait judicieux de bien évaluer. Nous pouvons être reconnaissant à M. Cariolle d'avoir bien voulu répondre à maintes questions. Pas à toutes. Il est donc utile de voir où en est notre questionnaire après cette importante contribution.*

R.H.

Effet de serre (ES)

A. La simultanéité n'induit pas nécessairement une relation de cause à effet et, s'il y en a une, n'indique pas qu'elle est la cause. La *figure 1* ci-après extrait du rapport de l'Académie des Sciences (*La vie des sciences*, 1991, p. 92) montre que les variations de la teneur de l'atmosphère en méthane et celles de sa température forment également des courbes quasi parallèles et même nettement mieux que le gaz carbonique il y a 70 à 100 000 ans. Étendue à CH_4, la logique appliquée à CO_2 ne conduirait-elle pas à limiter l'élevage des bovins et l'étendue des rizières ?

B. Il n'était pas dit que les études, donc les modèles des spécialistes, ne prenaient pas en compte la vapeur d'eau mais que c'était le cas des "discussions sur l'ES" (offertes aux non-spécialistes). Le réponse de M. Cariolle montre bien combien cela est regrettable.

* *Notre souhait de voir entrepris un effort de clarification est partagé par d'autres. En février dernier, d'après* Chemical and Engineering News *(20 mai 1993, p.14), le président de l'AAAS F. S. Rowland demandait aux spécialistes des "sous-spécialités étroites" (du domaine qui nous concerne ici) de dépasser celles-ci et de tenter l'expérience difficile de communiquer la "sound science" au public. Nous laissons au lecteur le soin d'établir sa traduction personnelle du mot "sound".*