

*Activités humaines et environnement : les problèmes scientifiques **

Ichtiague RASOOL

*«On ne peut descendre deux fois dans le même fleuve,
car les eaux encore et toujours s'écoulent».*

Héraclite, VI^e siècle av. J.C.

L'état de la planète Terre n'est pas statique. Il ne cesse de varier selon des durées qui vont de quelques secondes ou quelques heures à des milliers et des millions d'années. Le cycle quotidien du réchauffement solaire, les changements saisonniers de la végétation, les tourbillons des courants océaniques, les lents méandres du Gulf Stream et les croissance et décroissance des calottes glaciaires témoignent tous de la nature dynamique de l'environnement. Depuis les débuts de la pensée humaine, on a médité sur ce concept d'une Terre constamment changeante.

* *L'exposé donné le 19 décembre 90 par M. Rasool dans le cadre des Cours Publics du MURS à l'amphi Poincaré de l'ancienne Ecole Polytechnique reprenait, pour l'essentiel, dans la première partie de cet article, la communication qu'il avait faite au colloque de Lassay. On peut se référer au texte intégral dans les Actes du colloque publiés chez Larousse dans la collection "Essentiels".*

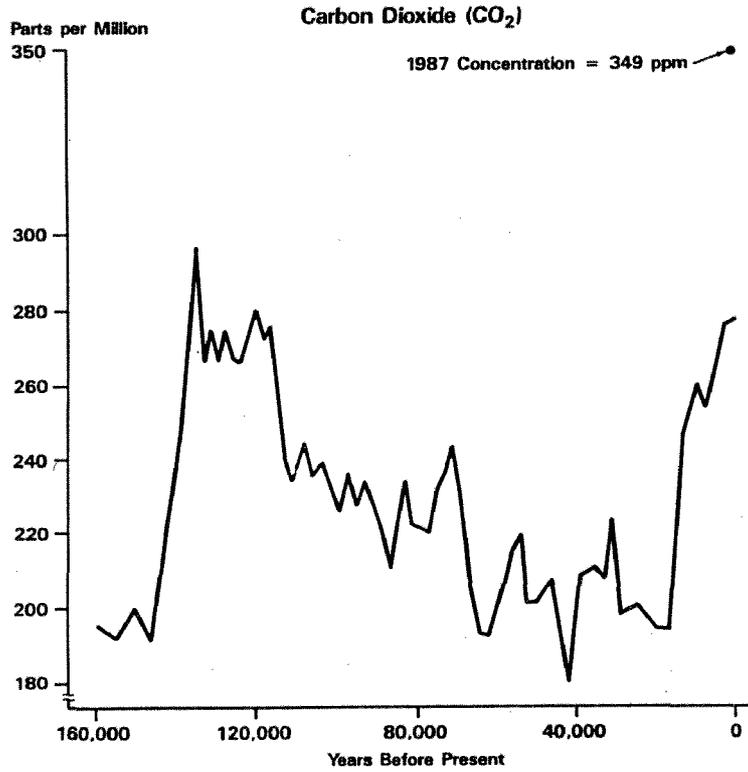
I. RASOOL

Ce qui est nouveau aujourd'hui, c'est que les changements apportés aux caractéristiques de la surface terrestre, à la nature chimique des rivières et des océans et à la composition de l'atmosphère par les activités humaines ont atteint une telle proportion qu'ils sont susceptibles de modifier non seulement l'équilibre de l'écosystème terrestre mais d'en altérer le cours. Il apparaît également clairement que des changements subtils et relativement limités des caractéristiques de la surface terrestre ou de l'atmosphère dans une région du monde peuvent avoir un impact économique et social important sur les habitants d'une autre partie éloignée du globe.

La preuve de tels changements va de la découverte du trou dans la couche d'ozone et de la possibilité de l'effet de serre à l'accélération du taux d'utilisation du sol et à la variation rapide de productivité de l'océan. L'importante question soulevée par ces modifications planétaires pour les sciences de la nature est de savoir pourquoi, en dépit d'avancées rapides dans les technologies spatiales et informatiques au cours des vingt dernières années, nous sommes toujours incapables de prévoir ces événements ou de prédire leurs conséquences avec certitude.

Le réchauffement dû à l'effet de serre est un exemple intéressant. On est tenté de considérer ce problème de la façon la plus simple. Les radiations solaires pénètrent dans l'atmosphère. Les gaz de l'effet de serre accroissent l'imperméabilité de l'atmosphère aux rayons infrarouges émis par la Terre, la chaleur est prisonnière et le climat se réchauffe. En réalité le problème est beaucoup plus complexe que cela. Il dépend entièrement de notre capacité à explorer simultanément trois domaines de recherche des sciences de la nature complètement différents : quelle est l'évolution dans le temps de la végétation et des sols sur la Terre, et comment ces changements influent-ils exactement sur l'accumulation des gaz de l'effet de serre dans l'atmosphère ? Comment la circulation au fond des océans régularise-t-elle les échanges de gaz à l'interface océan-atmosphère ? Quel est le processus des échanges chimiques dans l'atmosphère, et comment ceux-ci sont perturbés par les interventions humaines ?

Les progrès des techniques spatiales et l'amélioration des procédés informatiques sont naturellement d'un grand secours pour résoudre ces questions. Grâce à ces nouveaux outils, les scientifiques commencent à trouver des preuves du changement rapide de la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle du globe. Les scientifiques ont également commencé à faire la liste des problèmes que ces changements sont susceptibles de poser dans l'environnement mondial : trou dans la



Source: J.M. Barnola, et al., "Vostok Ice Core Provides 160,000-year Record of Atmospheric CO₂," *Nature*, Vol. 329, p. 410.

Figure 1
Variation à long terme de la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère

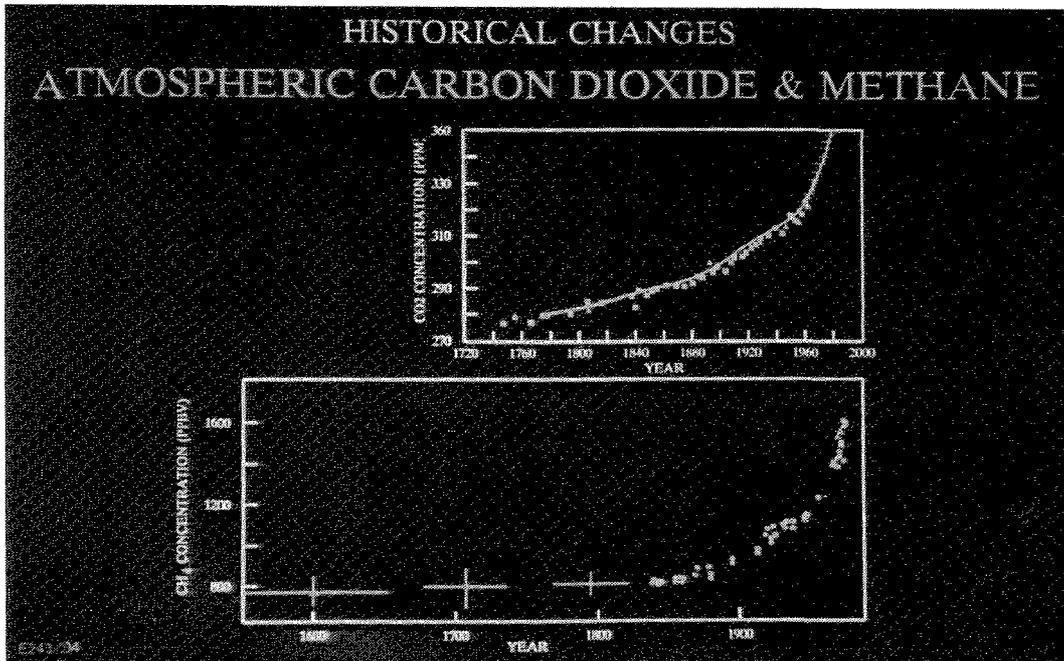


Figure 2
Changements de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone (en haut)
et en méthane (en bas) au cours des derniers siècles.

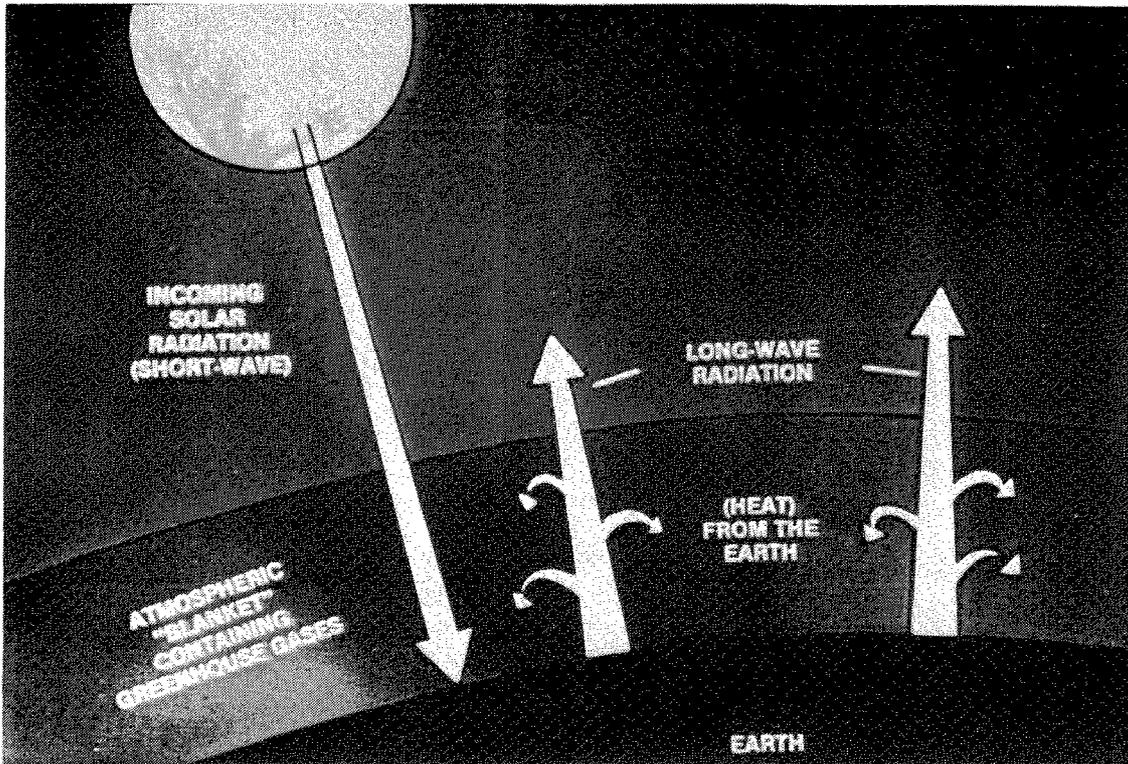


Figure 3

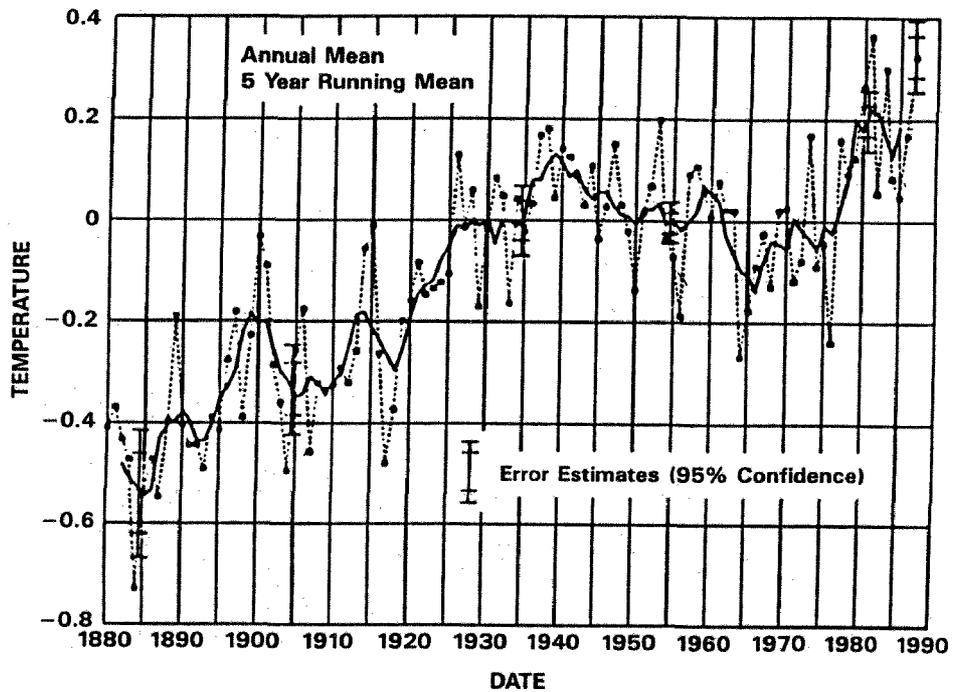


Figure 4

Evolution des températures moyennes du globe : valeur moyenne annuelle (points et pointillés) et moyenne sur cinq ans (trait plein). La marge d'erreur est indiquée pour certaines années. La période de référence va de 1880 à 1987. (Hansen and Lebedeff, 1988. American Geophysical Union)

couche d'ozone, réchauffement par effet de serre, désertification, érosion des sols, etc... Cette liste s'allonge à chaque nouvelle investigation.

Bien que ces changements aient à la fois des causes naturelles et humaines, il est clair cependant que nous autres hommes sommes responsables de beaucoup de ces problèmes. L'accroissement de la productivité et celui de l'automatisation de l'ère postindustrielle parviennent à peine à suivre le rythme de plus en plus élevé de l'accroissement démographique mondial. Pendant ce temps, les produits dérivés de la civilisation continuent d'être déversés dans l'atmosphère et les océans à un rythme sans précédent dans l'histoire de l'humanité.

La conséquence en est qu'il y aura des changements dans le climat du globe. La question qui est au coeur des débats de la communauté scientifique dans le monde est de savoir si ces changements seront importants ou limités et s'ils seront ou non irréversibles.

Les faits

Un examen des faits montre que les concentrations atmosphériques des principaux gaz de l'effet de serre : CO₂, CH₄, N₂O, et les CFC (chlorofluorocarbones) produits par l'homme, sont plus fortes aujourd'hui qu'à aucun moment au cours des 160.000 précédentes années (**figures 1 et 2**).

Ces gaz modifient l'équilibre des radiations de la Terre par l'effet de serre déjà mentionné (**figure 3**).

Il est démontré que la température moyenne du globe s'est élevée d'environ 0,5°C depuis le début du XIXe siècle (**figure 4**). Cet accroissement général de la température terrestre coïncide avec celui qui devrait résulter de l'augmentation des gaz de l'effet de serre.

Ce sont les seuls faits liés au problème du réchauffement de l'atmosphère du globe qui sont unanimement reconnus aujourd'hui par la communauté scientifique. Les autres projections sur l'impact de l'effet de serre sur notre planète sont sujettes à caution.

Les incertitudes

L'accroissement de la température moyenne du globe que l'on a pu observer n'a pas été uniforme sur la Terre et ne s'est pas fait au même rythme que l'accroissement des gaz de l'effet de serre. Cette situation conduit à s'interroger sur la validité de l'imputation au seul effet de serre du réchauffement récent de la température.

Une seconde incertitude provient de la connaissance que nous avons des perturbations majeures intervenues par le passé dans la température et le climat de la Terre qui continue d'être le siège de changements cycliques et saisonniers (figures 5 a-b). Au demeurant, on ne sait pas si les changements récents font ou non partie d'une tendance à long terme.

En outre, dans l'hypothèse d'une augmentation de la température, on s'interroge sur le rôle d'un accroissement de l'humidité et de la couverture nuageuse qui en résulte dans la modulation du climat. Les nuages bas réfléchissent la lumière solaire et réduisent en conséquence la tendance au réchauffement du climat. Les nuages hauts laissent passer la lumière solaire mais emprisonnent les radiations, accroissant ainsi la tendance au réchauffement de la terre.

Que penser aussi du rôle de la végétation sur terre et des éléments nutritifs dans les océans qui règlent le cycle du carbone (figure 6).

Enfin, il convient de mieux comprendre les effets régionaux et temporels. Il est extrêmement important d'être capable de différencier entre changements induits naturels et humains des températures dans des régions spécifiques, spécialement les régions qui sont importantes pour la production alimentaire mondiale.

Répondre à ces questions, cependant, nécessite une amélioration sensible des données et de notre compréhension du système terrestre dans son ensemble. S'ajoute à la liste des incertitudes le fait qu'il n'y a pas aujourd'hui de modèle capable de prévoir l'ampleur exacte de l'effet de serre, l'époque de sa survenance ou ses effets spécifiques régionaux et temporels. Alors que tous les modèles de circulation générale prévoient un accroissement de la température moyenne du globe d'environ 2 à 5°C avec un doublement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, il y a de grandes



Figure 5 - a



Figure 5 - b

Un exemple de variation de la calotte glaciaire boréale

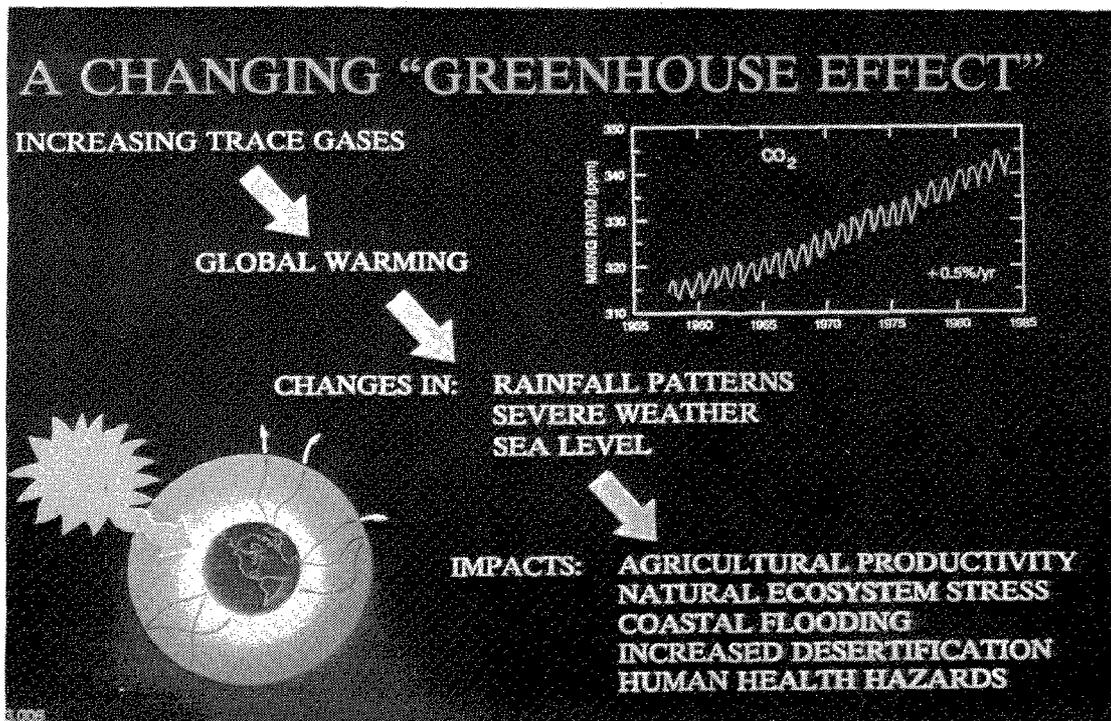


Figure 6
L'effet de serre



Figure 7
Auscultation de la planète

différences dans les amplitudes des changements prévus de la température régionale et saisonnière et dans les modèles et l'intensité des précipitations du globe. La plupart de ces différences attestent la complexité du problème et reflètent notre compréhension limitée des processus physiques, chimiques et dynamiques qui sont en jeu. Même en tenant compte de ces données incertaines, il est important de reconnaître que les activités humaines changent l'environnement du globe et qu'il existe une possibilité que ces changements soient irréversibles.

Non seulement les problèmes sont globaux par nature, mais leurs solutions sont directement liées à l'économie mondiale et au niveau de vie des populations du monde entier. Il faut agir pour améliorer notre compréhension du système terrestre dans son ensemble, pour fournir une base à la prévision des changements et pour donner un fondement solide aux décisions politiques qui protégeront notre avenir.

Les solutions

Les premières mesures peuvent être prises immédiatement. Des registres de données sont actuellement disponibles pour les dix ou vingt dernières années, et ils peuvent être analysés pour déterminer s'il y a un «signal» d'effet de serre clair et sans ambiguïté qui tranche sur le «bruit» actuel de changement climatique. Il est possible avec la technologie d'aujourd'hui de définir une approche intégrée à ce problème qui pourrait fournir «l'empreinte» complète laissée par les concentrations croissantes de gaz actifs rayonnants sur le climat du globe.

Avec la technologie d'aujourd'hui, nous pouvons également améliorer nos modèles de prévision. On peut le faire en incorporant le rôle des nuages, le recyclage des gaz «d'effet de serre» dans la biosphère, les changements des courants océaniques et l'effet d'une couverture végétale changeante sur les climats régionaux et mondiaux.

Il est important de faire ces efforts pour rechercher dans les données existantes une signature claire de l'effet de serre et pour améliorer nos modèles de prévision, mais nous devons aussi reconnaître que la compréhension de l'environnement du globe nécessite des approches nouvelles et innovantes pour étudier la Terre et son système climatique.

I. RASOOL

Il est nécessaire de mettre en place un programme à long terme d'un contrôle général intégré de la Terre à l'échelle du globe. Une telle perspective mondiale ne peut venir que d'observations spatiales qui doivent être faites en liaison avec des mesures directes d'un monde changeant et serviront également à tester des modèles et à vérifier les prévisions (**figure 7**). Il faut lancer une mission à grande échelle de la planète Terre pour commencer une étude à long terme de l'atmosphère, de l'Océan et des terres émergées qui nous indiquera comment ils évoluent et agissent réciproquement à une échelle de deux ou trois décennies.

Les Etats-Unis doivent prendre la tête de cet effort, non pas en agissant seuls, mais en faisant du problème du changement du globe une part permanente et importante des programmes scientifiques, politiques et étrangers. Nous pouvons par notre exemple indiquer la voie. Il n'est pas nécessaire d'attendre dix ou vingt ans pour procéder à des ajustements à notre manière de vivre ; cela aura des effets positifs immédiats sur l'environnement.

Nous savons, par exemple, que le réchauffement du globe et le dépôt d'acides sont liés à la forte dépendance en carburants fossiles. Nous devons donc augmenter à la fois l'efficacité et la préservation de ces ressources limitées tout en continuant notre recherche de sources d'énergie en carburant non fossile.

On sait également que la réduction de l'ozone dans la stratosphère est liée à des substances chimiques qui détruisent l'ozone, telles que les chlorofluorocarbures. Le Protocole de Montréal a été une étape importante, mais nous devons prendre des mesures pour arrêter totalement les émissions de ces produits chimiques en un temps raisonnable.

Enfin, nous pouvons agir pour préserver et protéger nos systèmes agricoles, forestiers et nos ressources en eau en examinant des stratégies qui prennent en considération les forces économiques et sociales qui conduisent actuellement à leur destruction. Il devrait être clair par exemple que la destruction de la forêt en Indonésie ou dans le bassin de l'Amazone au Brésil pourrait avoir des conséquences dévastatrices au niveau local et régional ainsi que des effets mondiaux potentiels. Une preuve sans équivoque de ce type pourrait inciter à des efforts de préservation qui seraient bénéfiques pour l'économie locale et la communauté mondiale tout entière.

Des implications multiples

De nombreuses questions scientifiques actuelles ont un impact important sur l'économie, la politique internationale, voire même la vie de tous les jours. Recourir ou non à l'énergie nucléaire est l'objet d'un débat qui touche tous les aspects de la science et de la culture. Après Three Mile Island et Tchernobyl, il est devenu encore plus complexe et a acquis une dimension émotionnelle, parfois aux frontières de l'hystérie.

De même les pluies acides, la pollution à l'échelle d'un pays, sont d'autres problèmes où des données scientifiques sont nécessaires, mais non suffisantes pour fonder des décisions politiques.

Le problème de l'effet de serre, qui appelle aussi une action globale concertée, est loin d'être aussi clair que celui de l'ozone. Ce dernier constitue un cas exemplaire d'une prédiction scientifique, ensuite confirmée, qui a déclenché une action politique globale (décision historique de Montréal). La connaissance scientifique est encore floue concernant l'effet de serre, le résultat à attendre des mesures proposées n'est pas quantifiable ; d'autre part, supprimer toutes les émissions des gaz qui créent l'effet de serre aurait des conséquences économiques gigantesques. Examinons les données et les inconnues. Trois faits sont actuellement admis.

- La concentration atmosphérique des principaux gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde d'azote, CFC) est plus élevée aujourd'hui qu'en aucune période au cours des 160.000 dernières années.

- Ces gaz affectent l'équilibre radiatif de la Terre à travers leur effet de serre.

- Il semble établi que la température moyenne du globe a crû de 0,5 degré Celsius depuis la fin du XIXème siècle. Cette augmentation est cohérente avec ce qu'on peut attendre de la croissance des concentrations de gaz à effet de serre.

Il reste d'autre part de nombreuses incertitudes, et toute prospective globale sur le climat des prochaines décennies repose sur des hypothèses non encore établies. Par exemple, il n'est pas superflu de le répéter :

- L'accroissement récent de la température moyenne du Globe n'a été, ni

monotone, ni uniforme sur toute la Terre, contrairement à la croissance des gaz à effet de serre. Cela met en question la validité de l'hypothèse suivant laquelle l'effet de serre est la seule cause de l'accroissement de température.

- On sait que la Terre a connu dans le passé des évolutions climatiques majeures, et qu'elle continue de subir des changements saisonniers de cycliques. On ignore si les modifications climatiques récentes traduisent pour partie ces évolutions à long terme, et dans quelle mesure.

- Si la température continue de croître, quel sera l'impact climatique de l'accroissement corrélatif de l'humidité atmosphérique et donc de la couverture nuageuse ? Les nuages bas réfléchissent la lumière solaire et tendent donc à réduire l'échauffement. Les nuages de haute altitude laissent passer la lumière solaire mais bloquent le rayonnement terrestre ; ils favorisent donc l'augmentation de température.

- Qu'en est-il du rôle de la végétation terrestre et du plancton océanique, qui contrôlent le cycle du carbone ?

Il apparaît finalement le besoin de mieux connaître les effets régionaux et leur variation dans le temps. Il est en particulier critique de distinguer les changements de température d'origine naturelle et d'origine humaine dans certaines régions, particulièrement celles qui sont importantes pour la production agricole mondiale.

C'est donc un problème complexe que de définir une politique globalement cohérente pour traiter de l'effet de serre. En effet elle est directement liée à l'économie mondiale et au niveau de vie de l'ensemble des populations terrestres. Au regard des incertitudes de la connaissance, des mesures draconiennes, dont le résultat serait douteux, sont certainement inappropriées. Mais d'autre part, nous ne pouvons attendre pour agir que tous les faits soient connus. Il est peut-être dès maintenant trop tard. Que faire alors ? Trois actions immédiates s'imposent.

- Il faut engager un programme intensif de recherche, qui devrait inclure des mesures complètes à l'échelle de la Terre, pour réduire les incertitudes ; ainsi nous, les scientifiques, pourrons avec assurance dire aux décideurs les avantages et les inconvénients des actions proposées.

- Puisque le principal coupable paraît être l'usage excessif de combustibles fossiles, il est important d'augmenter l'efficacité avec laquelle nous utilisons l'énergie, comme l'ont fait le Japon et l'Allemagne de l'ouest. En même temps il faut intensifier la recherche d'autres sources d'énergie.

- Enfin il faut faire campagne pour une diminution du rythme auquel nous brûlons la biomasse, combustion qui est responsable pour moitié de l'accroissement du gaz carbonique dans l'atmosphère, et simultanément pour freiner la déforestation. Celle-ci serait de 30.000 kilomètres carrés par an pour le seul Brésil, soit la surface de Paris chaque jour.

Ces mesures ne devraient être que le début d'une action correctrice à long terme. Au fur et à mesure que la science progressera, que les incertitudes diminueront, les actions à mener deviendront plus visibles. Mais elles seront dures. Le soutien du public sera crucial ; il est donc satisfaisant que la préservation de l'environnement soit enfin considérée comme un problème **global**.

Ichtiague RASOOL
Responsable scientifique du programme
"Global Change" à la NASA