

LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

par Laurent TURPIN,

Directeur du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement à Saclay (CNRS-CEA/IPSL).

CR par Christiane Drevet,

■ Principe physique de base - constat des émissions « anthropiques » des GES (gaz à effet de serre) - conséquences sur la température moyenne

Si les GES n'existaient pas à l'état naturel dans l'atmosphère, la température au sol de la planète, due à l'irradiation solaire, ne serait que de -18°C en moyenne. C'est grâce à leur présence que la température peut se maintenir à 15°C . En effet, les molécules triatomiques de la proche atmosphère qui constituent ces gaz, peu réactives et non toxiques, absorbent le rayonnement infrarouge réfléchi par la terre et en réémettent une partie sous forme de photons, qui sont renvoyés à leur tour vers le sol et le réchauffent. Le bilan radiatif, en W/m^2 , peut alors se représenter schématiquement selon la **fig 1**.

324 des 390 W/m^2 réfléchis par le sol sont ainsi réémis par les GES. Ce chauffage radiatif « naturel » est principalement dû à la vapeur d'eau (50%), suivi par le CO_2 (33%), puis par le méthane, les CFC, l'ozone, ... Jusqu'au début de l'ère industrielle (1750 environ), les concentrations dans l'atmosphère du CO_2 , exprimées en ppm, parties par million, et du méthane, exprimées en ppb, parties par milliards, oscillaient conformément aux cycles astronomiques (précession, obliquité, de l'axe de rotation, activité solaire et surtout excentricité de l'ellipse de période environ 100.000 ans, ...), correspondant ainsi aux grandes glaciations et déglaciations successives. Ces concentrations sont reconstituées de façon crédible d'après l'analyse des bulles d'air piégées dans les carottes de glace de la calotte polaire antarctique, alors que dans le même

temps, la température de l'atmosphère à ces époques y est évaluée par la teneur en O_18 . On peut ainsi relier sans ambiguïté température et concentrations de CO_2 et de méthane dans l'atmosphère, cf **fig 2**.

Figure 2

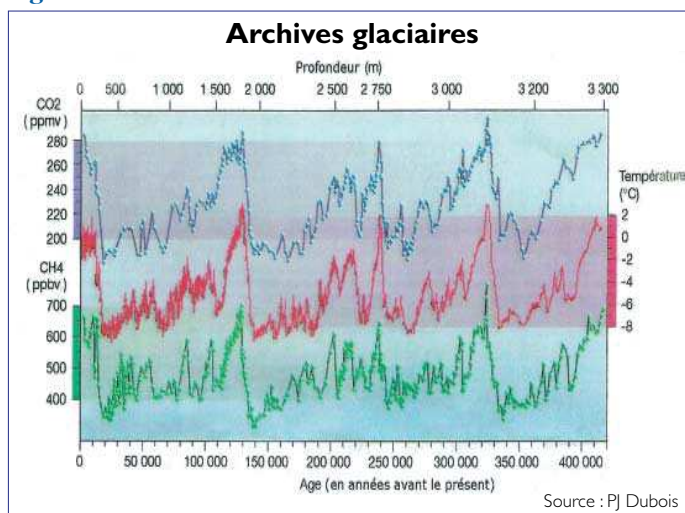
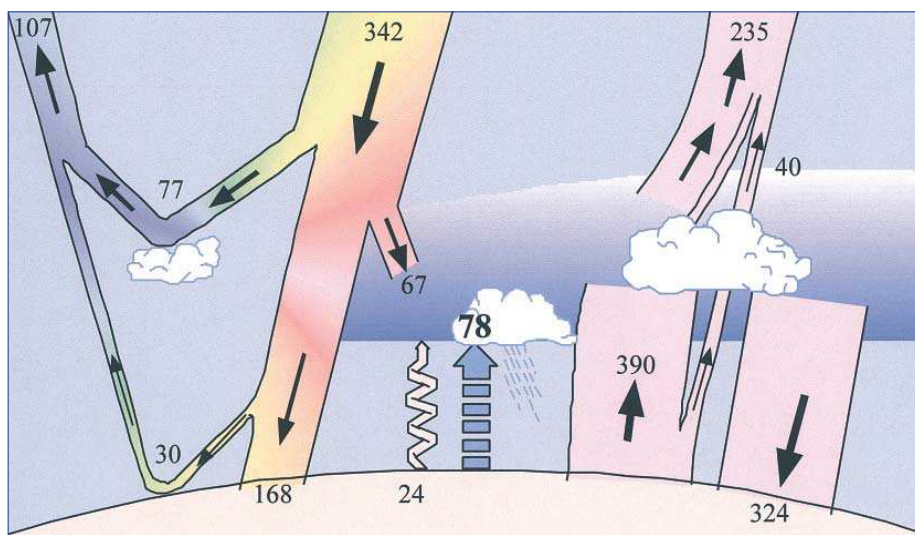


Figure 1 Bilan radiatif moyen (en watts/m²)

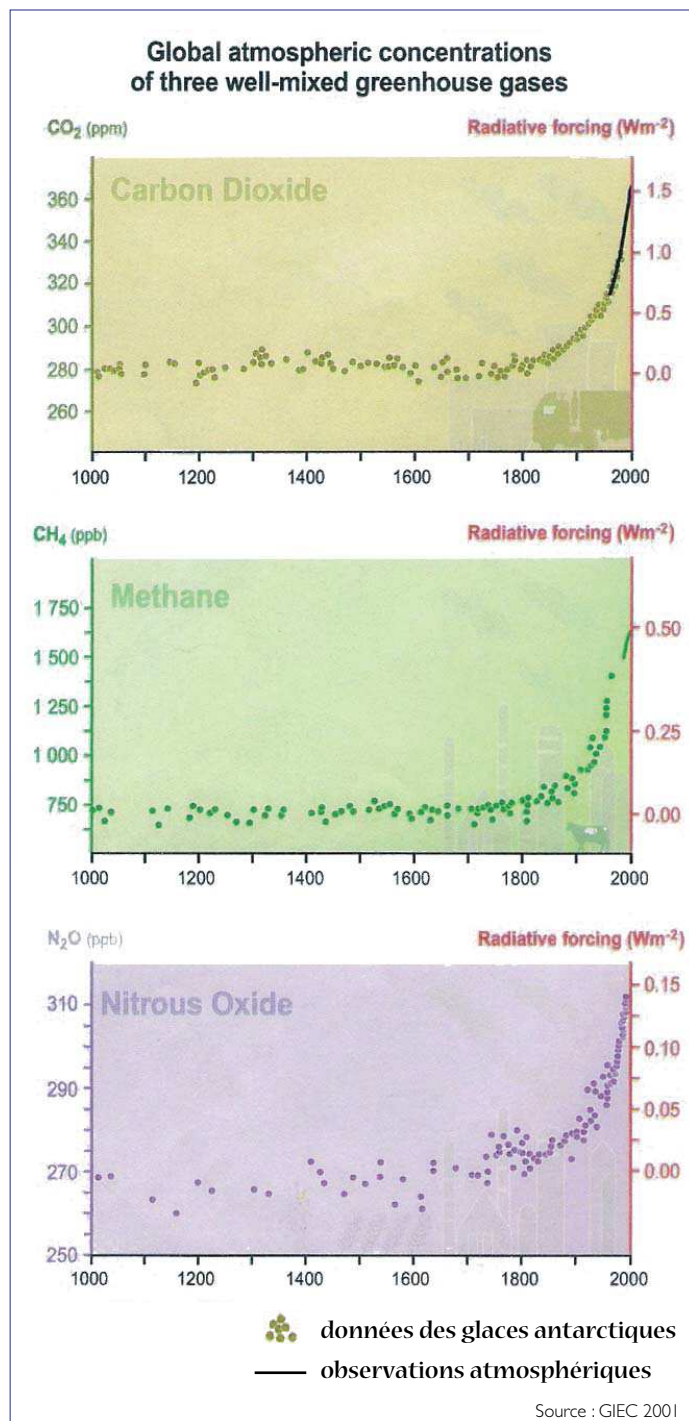


Source : GIEC 2001

En prenant l'exemple particulier du CO_2 , on constate qu'à l'état d'équilibre, les émissions naturelles des sols (respiration, décomposition) et des océans (circulation océanique des zones froides vers les zones chaudes), soit en tout 150 Gt de C par an, sont exactement compensées par les absorptions des sols (photosynthèse) et des océans (pompe biologique), ce qui correspond actuellement à une masse de 750 Gt de C dans l'atmosphère (1 kg de carbone correspond en fait à 3,7 kg de CO_2 et c'est cette unité d'équivalent carbone qui est souvent choisie, lorsque on l'étend à tous les autres GES selon leur pouvoir respectif de réchauffement global à 100 ans). Qu'advient-il depuis les années 1800 ? Ces taux de GES n'ont cessé d'augmenter de façon anormalement rapide, en particulier, depuis 1900, où les mesures par carottage et observations atmosphériques concordent parfaitement entre elles, cf **fig 3**.

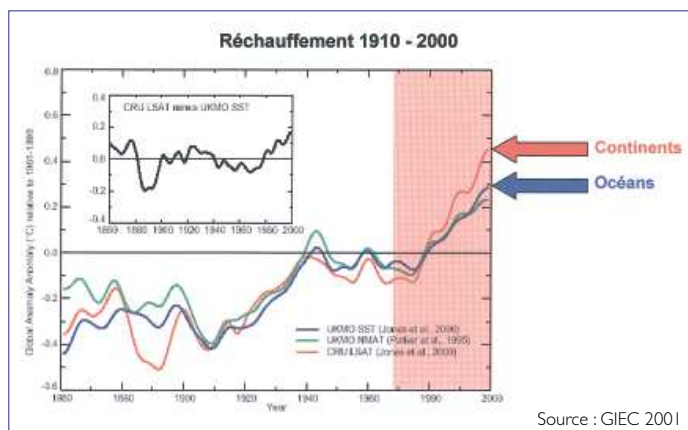


Figure 3 - Evolution des GES



On y relève ainsi un «forçage» radiatif, dû en majeure partie au CO₂, avec 1,5 W/m² additionnel en 2000 (3 fois plus que le méthane et 10 fois plus que l'oxyde nitreux) et un taux du CO₂ jamais atteint auparavant de 365 ppm. Ce «forçage» radiatif correspond à une augmentation du Carbone (C) dans l'atmosphère de 3,3 GtC par an (mesuré depuis une vingtaine d'années), dont (+6,3) dus à la combustion des fossiles et la production des ciments, (+1,6) pour la déforestation contre (-4,6) seulement fixés par les sols et l'océan. Il en a résulté une élévation anormale et mesurée de la température moyenne du globe au cours du siècle dernier, de près de 1° C, cf **fig 4** avec en Europe, un retrait des

Figure 4



glaciers, une augmentation des journées chaudes et des précipitations brutales, une diminution de l'enneigement,... Si cette élévation semble en soi mineure aujourd'hui, on verra, lors de l'examen des modèles de prévision futurs, qu'elle pourrait prendre une toute autre ampleur, selon les différents scénarios de croissance de la population et de consommations envisagés d'ici la fin du siècle (prenant en compte l'émergence de pays tels que la Chine, le Brésil ou l'Inde,...).

■ Emissions anthropiques différentielles actuelles d'équivalent Carbone. Comment les compenser par les puits de C naturels

On peut représenter les émissions par pays, par habitant et par an, par type de technologie de production, par unité de PIB ou par unité d'énergie consommée (ramenée à la tep, tonne équivalent pétrole), par type de consommation, toutes données ayant chacune leur propre avantage.

Il est intéressant, avant d'examiner les courbes présentées par Laurent Turpin, de rappeler la formule simple suivante, reliant la quantité QC de C envoyée dans l'atmosphère par an par la population du globe N, en passant par divers rapports d'ordre plus économiques. Ainsi :

$$QC = (QC/tep) \times (tep/PIB) \times (PIB/N) N$$

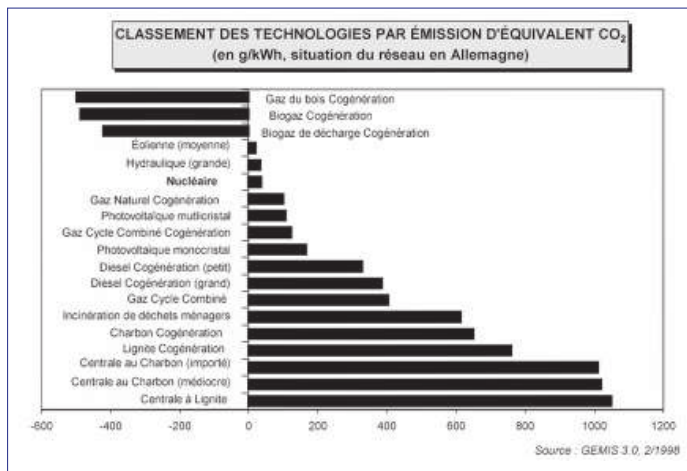
On voit ainsi que, si l'on veut augmenter la richesse créée par habitant et par an, sans augmenter significativement l'émission de C dans le contexte d'une population croissante, il faut simultanément diminuer le 1^{er} facteur, c.a.d. utiliser des sources d'énergie peu émettrices en C, et diminuer le 2^e facteur, en utilisant des technologies sobres en énergie.

Conjointement, pour un puits de carbone potentiel de la planète de 4 Gt de C par an en moyenne, et si l'on souhaite à terme annuler toute augmentation de GES dans l'atmosphère (on verra plus loin les prévisions d'évolution des concentrations de C et des températures selon les modèles du GIEC), il faudrait ramener l'émission mondiale annuelle à 4Gt de C pour les 6 milliards d'habitants de la planète, soit une émission par an et habitant de 650 kg de C.



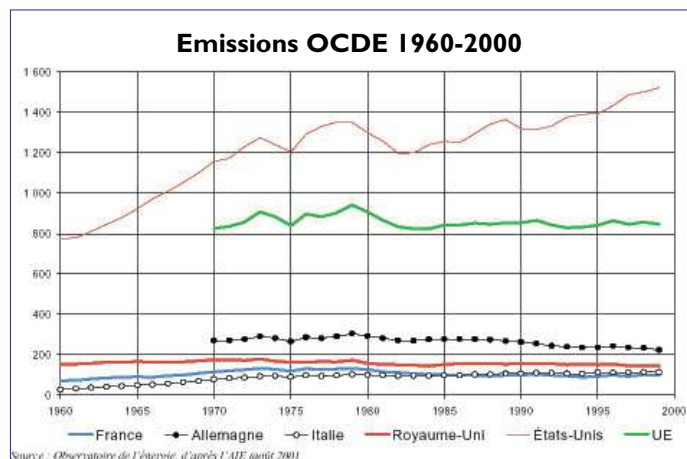
La **fig 5** représente les émissions de C par kWh produit selon les diverses technologies, la plus émettrice étant le charbon.

Figure 5



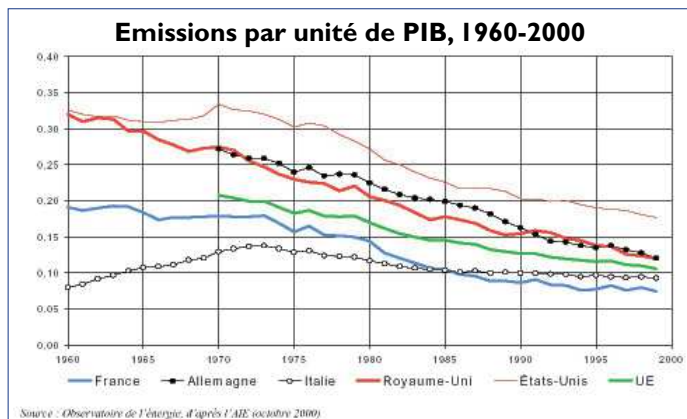
La **fig 6** montre les émissions annuelles en Gt de C pour les pays de l'OCDE, en particulier celles des USA qui continuent de croître et représentent deux fois celles de l'Europe qui sont, elles, stabilisées.

Figure 6



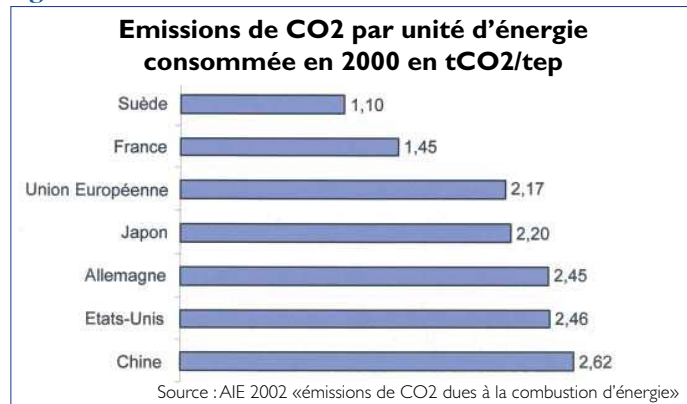
La **fig 7** représente le produit des 2 facteurs de la formule pour différents pays d'Europe et les USA. On constate une diminution de cette quantité depuis les années 1970, donc une économie plus efficace, mais les USA restent toujours au-dessus des autres pays.

Figure 7



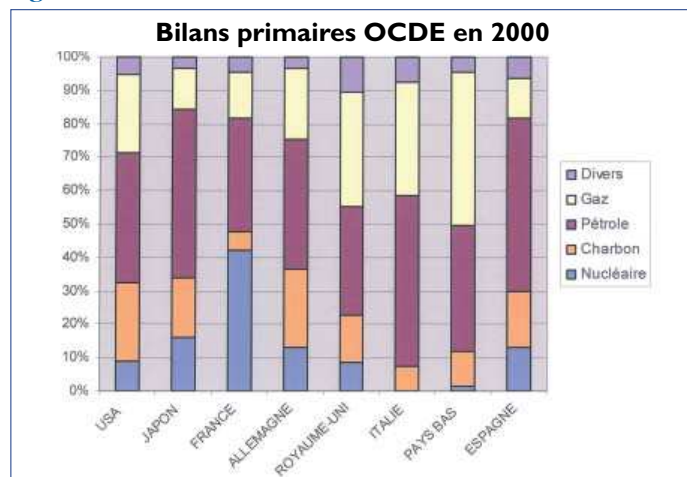
La **fig 8** représente le 1^{er} facteur de la formule selon différents pays du monde.

Figure 8



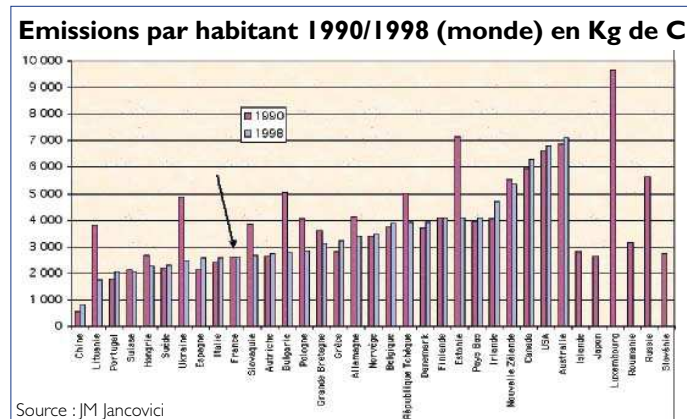
La bonne position de la France provient de la part importante qu'elle a fait au nucléaire, en minimisant ainsi ses consommations en pétrole, charbon et gaz, comme représenté **fig 9**.

Figure 9



La **fig 10** représente les émissions annuelles de C dans le monde en 90 et 98, par habitant et selon les pays. Pour atteindre l'objectif assigné plus haut de 650 kg de C par an et habitant, qui est le niveau actuel de la Chine, la France devrait diviser ses émissions actuelles par 4 et les USA par près de 10 ! !, et encore plus en cas de croissance de la population mondiale (si 9 à 10 milliards en 2050). C'est donc une véritable mutation de société qu'il faudrait engager le plus rapidement possible.

Figure 10

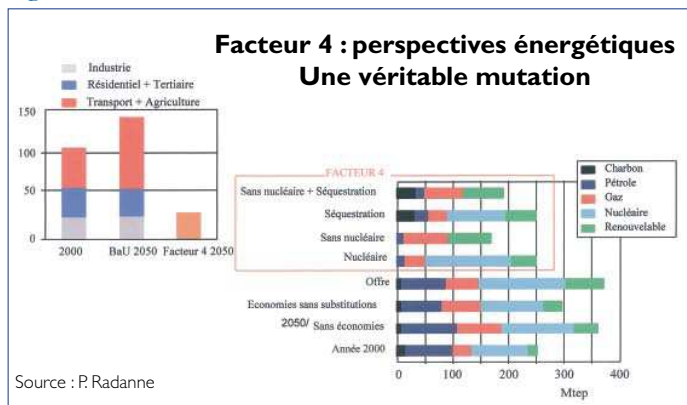




La **fig 11** représente la situation de la France (étude de P. RADANNE pour le MIES), où, pour diviser par 4 les émissions de C en 2050, tout en s'interdisant de consommer plus (diminution de consommations unitaires), les 2 solutions extrêmes suivantes pourraient répondre à la question :

- augmenter la part de nucléaire et de renouvelables, en conservant très peu de fossiles,
- augmenter la part des renouvelables, en conservant gaz et nucléaire au même niveau, en minimisant le pétrole, augmentant le charbon tout en séquestrant le carbone.

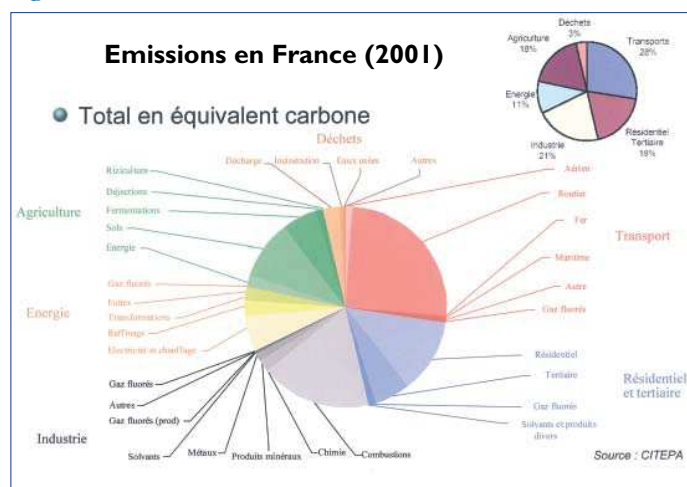
Figure 11



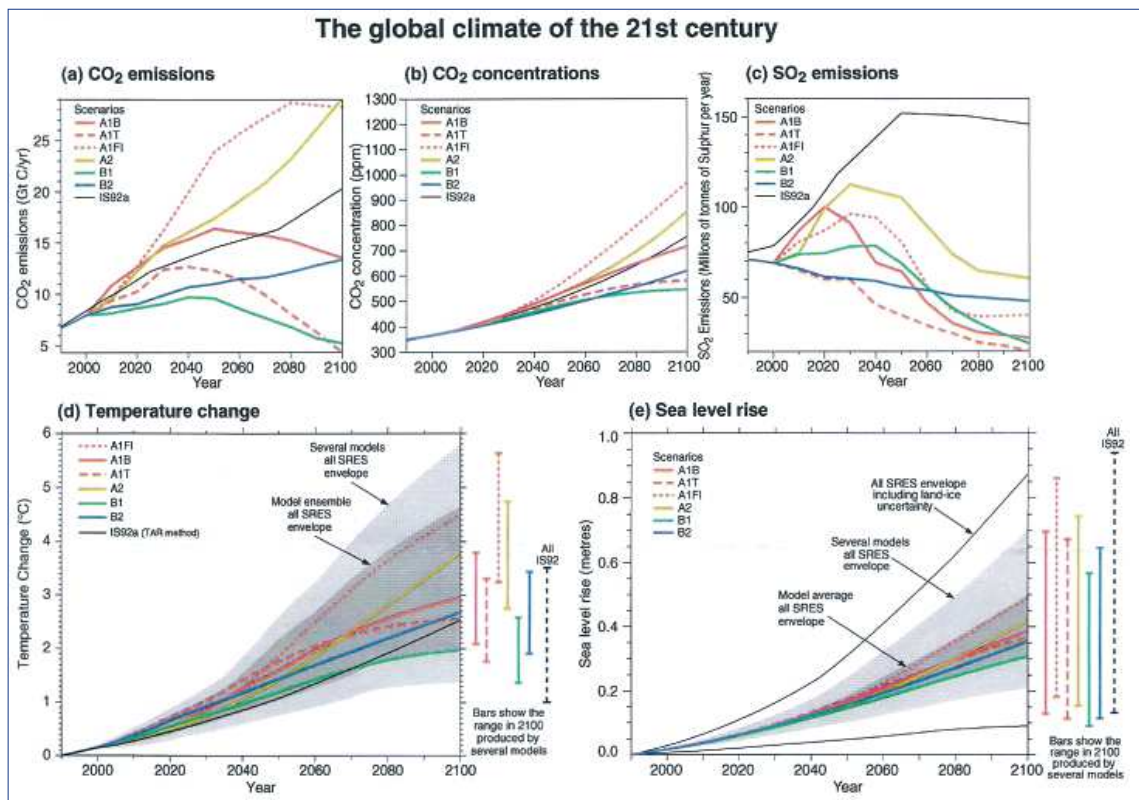
La **fig 12** représente les émissions en équivalent C en France en 2001, par type d'activité, la plus grosse contribution revenant aux transports, avec 28 % du total, puis à l'industrie, avec 21 %, au ré-

sidentiel tertiaire avec 19 % et à l'agriculture avec 18 %. L'objectif serait donc à terme, en plus des diminutions de consommation unitaires pour les transports, de développer les biocarburants, de faire appel à une motorisation sans recours aux fossiles et d'engager une politique d'optimisation de la mobilité. Pour l'habitat et la production d'énergie, il serait nécessaire d'engager sans tarder une politique de rénovation de l'existant, pour y diminuer la consommation d'énergie et de développer les énergies renouvelables pour les bâtiments neufs. Enfin, il faudrait repenser l'agriculture et surtout aider les pays du Tiers-Monde à se développer sans pérenniser nos erreurs.

Figure 12



■ modèles d'évolution des températures du GIEC pour le siècle à venir



Les résultats du GIEC (IPPC en anglais) sont une compilation mondiale des différentes élévations de température escomptées à la fin du siècle, calculées selon différents modèles physiques d'échanges entre l'atmosphère, les terres et les océans, et avec des scénarios très contrastés de croissance de la population et de consommation d'énergie, cf **fig 13**.

Figure 13

Source : GIEC 2001



On y retrouve également les mêmes résultats pour une stabilisation à terme du CO₂ présent dans l'atmosphère à des niveaux variant de 450 ppm à 1.000 ppm, cf **fig 14**.

Il est à remarquer que cette stabilisation ne peut être immédiate, car le CO₂ émis reste près de 100 ans dans l'atmosphère et les océans ont une grande inertie thermique.

Il est à noter également, que seul un tel modèle, ici celui du Hadley Center (cf **fig 15** ci-dessous), couplé au cycle du carbone comme celui de l'IPSL (LSCE/CEA-CNRS), recalé sur le passé et prenant en compte à la fois les causes naturelles et anthropogéniques de l'élévation de température du siècle précédent, permet de la restituer correctement.

Figure 14

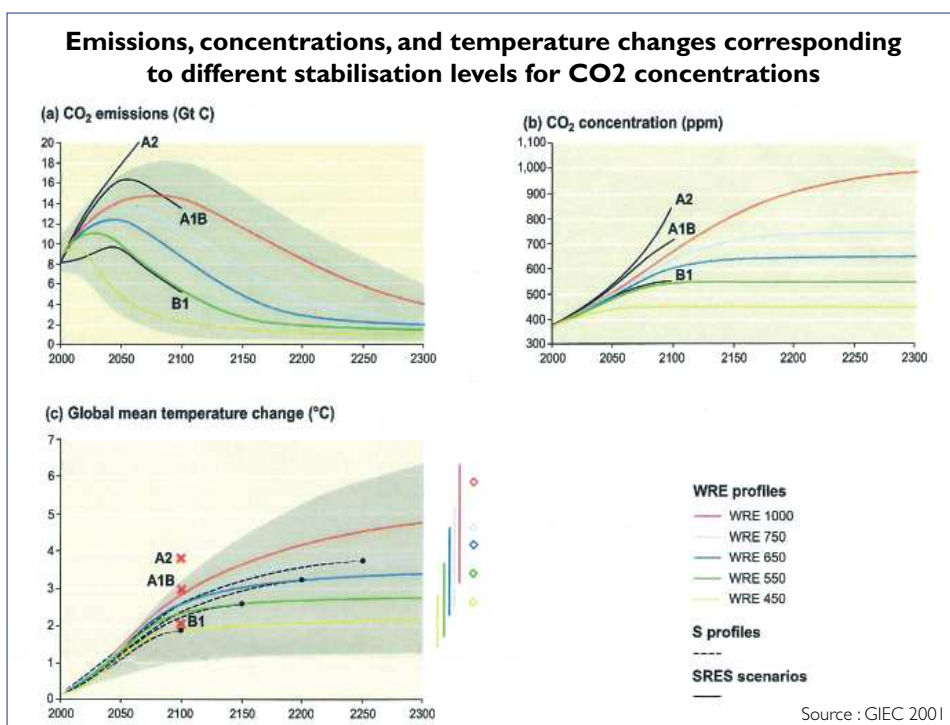
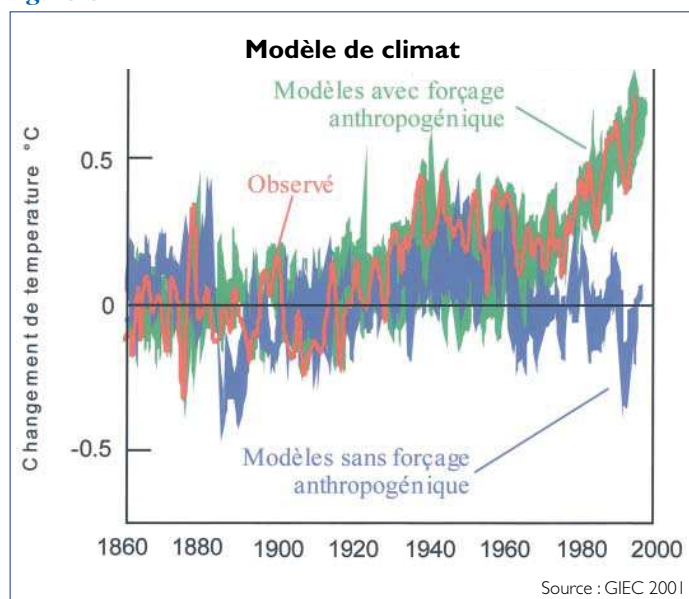


Figure 15



La **fig 13** déjà citée représente l'ensemble des prévisions à 100 ans, selon six scénarios caractéristiques, avec leurs marges d'incertitude provenant des différents modèles utilisés dans le monde. De façon générale, la dispersion des modèles pour un même scénario est de 2, voire 3° C, et provient en grande partie des incertitudes sur la formation et la structure des nuages ; l'exploitation des mesures par satellites devraient permettre de les réduire peu à peu. Cette dispersion est du même ordre pour les différents scénarios envisageables, avec un modèle donné. Deux scénarios extrêmes, correspondant chacun à un plafonnement de la population à 9 Milliards en 2050 (5 en Asie, dont 3 en Inde et Chine, 2 en Afrique et 1 pour l'ensemble, Europe et USA) sont commentés. Le scénario A1FI, le plus pessimiste, correspond à une forte croissance économique, avec homogénéisation des comportements dans le monde et utilisation intensive des fossiles, comme à l'heure ac-

tuelle où elle représente 85 % des consommations (pour 62 % en France). Dans ce cas, le taux de CO₂, en croissance exponentielle, atteint les 1000 ppm en 2100 et les élévations de température la fourchette de 3 à 6° C.

Le scénario B1, le plus respectueux de l'environnement, correspond à une prise en compte d'un développement global économique et social durable (équité améliorée, technologies diversifiées économes et propres). Le taux de CO₂ y plafonne à 550 ppm et les élévations de température y atteignent de 1,5 à 3,5° C. Y sont également représentées les augmentations d'émissions de CO₂ en Gt de C et celles du niveau des mers. Seul le scénario le plus économe voit ses émissions rejoindre le puits de C naturel (4 Gt de C annuels), mais seulement après 2100.

Notons également l'élévation du niveau des mers, qui pourrait atteindre plus de 80 cm en 2100, compte tenu de la dilatation des mers et de la fonte des glaciers. Le réchauffement, encore plus important aux pôles qu'à l'équateur, pourrait y provoquer, après dépassement d'un certain seuil, une accélération de la fonte des glaces, se traduisant au pôle Nord par un ralentissement, voire un arrêt de la grande circulation océanique. L'océan, du fait de son énorme capacité calorifique constituant une composante lente du système, des phénomènes irréversibles pourraient s'y produire avec l'élévation du niveau de mers pendant plus de 1000 ans sur plus de 10 mètres. D'autres conséquences brutales et irréversibles pourraient également se produire : évaporation accrue aux tropiques réduisant la capacité des grandes forêts à retenir le carbone, libération massive du méthane contenu dans le sol actuellement gelé de Sibérie (Permafrost), ... Ces menaces, quoique lointaines et incertaines, sont cependant directement liées aux comportements que nous choisirons d'adopter dans un proche avenir.

Les calculs du GIEC, qui seront présentés à nouveau en 2006, intégreront une meilleure prise en compte des cycles chimiques et biochimiques de l'atmosphère. Les résultats semblent déjà indiquer en 2100 une hausse supplémentaire de 2° C pour le maximum de température.



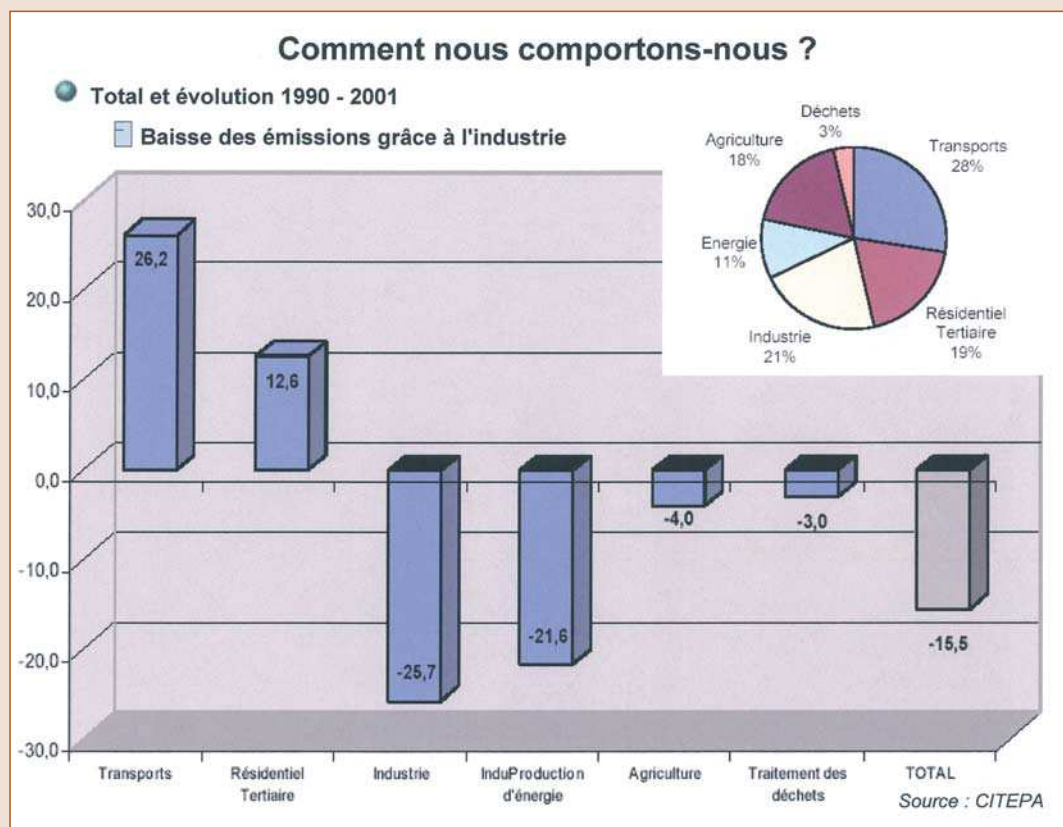
■ Que faire, quand et comment ?

On a vu, dans le cadre d'un scénario de type B1, permettant au CO₂ de plafonner à 550 ppm en 2100, ou dans le cas d'une diminution des émissions de C à 4 Gt annuelles environ, que cela nécessiterait un effort particulier dans les pays développés de division par 4 à 10 de leurs émissions. En France, des solutions théoriques pour une division par 4 dès 2050 ont été proposées sur le papier et sont donc possibles (fig 11 déjà citée). La tâche peut paraître immense, car l'enjeu est bien un changement décisif de nos modes de vie, de consommation, avec une volonté explicite et partagée par la majeure partie de l'humanité, durant plusieurs décennies au moins.

La prise de conscience est maintenant mondiale. Dès 1979, le programme des nations unies pour l'environnement est lancé. En 1988 est créé le GIEC (IPCC en Anglais) dont les travaux sont publiés tous les 5 ans. En 1992, une première convention-climat est signée à Rio. Elle préconise de ramener, avant l'an 2000, les rejets de GES au niveau de 1990, pour un développement économique durable (cet objectif n'a pas été tenu par tous), et recommande l'adoption du principe de précaution, en cas de risques de perturbations graves ou irréversibles. Des protocoles additionnels sont prévus en cas de nouveaux accords sur des modalités de mise en œuvre. Le premier du type, le protocole de Kyoto, a été signé en 1997 et entre aujourd'hui en vigueur. L'objectif est une réduction

de 5 % des émissions de C pour les pays de l'OCDE, du bloc de l'Est et du Japon (pays dits de l'annexe 1) d'ici 2008/2012, par rapport à celles de 1990, alors que les émissions tendanciennes pour 2010 auraient été de 30 à 40% supérieures. Les pays en voie de développement (dits de l'annexe 2), tels que l'Inde, la Chine et le Brésil sont exclus pour l'instant de l'accord. Pour l'Europe, c'est une baisse de 8%, pour la France, il n'y a pas de contrainte de décroissance, pour le USA, c'est moins 7%, mais ces derniers n'ont pas signé le protocole de Kyoto, bien que beaucoup d'états prennent individuellement des mesures dans ce sens. Des mécanismes de ventes et achats de permis d'émission sont autorisés, dans le contexte de la décroissance des émissions pour les pays concernés, avec le danger de ne pas décroître autant qu'on aurait pu le faire. Des mécanismes de développement propre en faveur des PVD sont également mis en place. Il s'agit d'investissements faits sur des technologies peu émettrices en C, donnant des droits supplémentaires à émettre dans les pays qui les financent (l'évaluation n'en est pas très facile, et c'est un conseil exécutif de l'ONU qui statue sur l'éligibilité des projets). La tentation, là encore, serait, pour les pays développés, de s'affranchir à bon compte de tout effort en matière de réductions d'émissions. Et en France ? Le MIES est créé. L'application des mesures a dépassé les espérances, puisque les émissions ont chuté globalement de 1990 à 2000.

La **fig 16** représente ces évolutions selon différents secteurs de consommation. C'est grâce aux efforts de l'industrie que le résultat a été obtenu, les transports et le résidentiel ayant dans le même temps cru de façon non négligeable. C'est sur ces secteurs que les efforts devraient porter (diminution des vitesses et des trajets, développement des transports en commun, nouveaux combustibles, optimisation de l'habitat, ...). On a vu que la baisse des émissions de 5% en 2008/2012, par rapport au niveau de 1990 et pour les pays de l'OCDE, n'est pas suffisante. Il faudrait à terme parvenir à un division par 2 des émissions annuelles mondiales, tout en permettant aux pays en développement de croître. En 2012, l'après-Kyoto sera une charnière cruciale. Où en seront les pays en émergence ?



Quelles seront les mesures à prendre et à quelle échéance ? Elles devraient logiquement être d'une toute autre ampleur (baisse de la demande énergétique par un moindre usage et une meilleure efficacité, décarbonation de l'énergie, séquestration du carbone, réduction de la pauvreté dans le monde et maintien de la stabilité politique). L'avenir nous dira si l'humanité aura alors décidé ou non de prendre son propre destin en main. Mais encore faudrait-il qu'elle soit complètement informée des risques encourus. C'est sans doute du devoir des pays développés, et ceux-ci principalement, d'œuvrer dans ce sens.

Figure 16



Précisions apportées par Monsieur Laurent TURPIN suite aux différentes questions posées par l'auditoire

1 le potentiel de la géothermie est surtout présent dans les régions très volcaniques, ce qui n'est pas le cas de la France. L'Islande, par contre, escompte diviser par 4 ses émissions à l'aide de la géothermie et de l'utilisation de l'hydrogène.

2 le nucléaire n'est qu'une solution parmi d'autres, pour la production d'électricité, et n'est pas applicable aux transports. En effet, l'Hydrogène ne pourra être produit en masse que dans les réacteurs de 4ème génération, et ceci pas avant les années 2050. De façon générale, d'ici 2050, les réductions ne proviendront que de technologies disponibles aujourd'hui.

3 Des fermes éoliennes pourraient être développées en offshore, et des panneaux solaires dans les régions désertiques, mais ces gisements ne correspondront qu'à une consommation locale (de même que le Biogaz et la Biomasse). Ces sources ne pourront jamais produire de l'électricité à grande échelle, car elles ne sont ni stockables ni transportables.

4

Un sondage de l'ADEME récent a montré que le cercle le moins conscient des efforts à faire en matière de réduction des émissions de CO2 (le facteur 4 par exemple) était constitué de parlementaires, toutes opinions confondues. Par contre, les industriels ont œuvré, et oeuvrent encore, dans le sens d'une diminution de leurs émissions de C, en prévision des taxes qui ne manqueront pas d'y être appliquées.

5 le «forçage» radiatif est évalué grâce aux mesures satellitaires des radiations infra-rouges émises dans toutes les directions, ceci permettant d'établir le bilan directionnel radiatif de la basse atmosphère.

6

La part de l'aérien dans les transports n'est actuellement que de quelques % mais elle va fortement croître.

7 Les biocarburants ne sont pas la panacée, car ils nécessitent un développement d'une agriculture émettrice de GES (N2 O et CH4) et l'utilisation d'engrais chimiques industriels.

8

Dans les 10 ans, les USA disposeront d'une unité de démonstration produisant de l'électricité et de l'hydrogène à partir du charbon, allié à une installation de séquestration du C. Ils vendront cette technologie aux chinois et aux indiens, gros consommateurs de cette source fossile. Ceci aura un coût, car 30% de l'énergie produite sera consommée par la séquestration.

9 Les modèles, tels que ceux rassemblés dans la synthèse du GIEC, ne sont que des outils de recherche pour comprendre les mécanismes régissant le climat. Ils ont énormément progressé depuis 5 ans, avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, permettant des maillages de plus en plus fins. En particulier, la physique de création « locale » des nuages et de leur structure, qui ne pouvait être prise en compte que statistiquement, ce qui induisait la majeure partie des barres d'erreur, s'affine aujourd'hui avec des maillages de l'ordre du km, réduisant d'autant les incertitudes des modèles.

11

Les estimations d'arrêt du gulf stream ou du dégel du permafrost de Sibérie délivrant de grandes quantités de méthane, n'en sont qu'au stade d'évaluations trop récentes pour être entièrement crédibles aujourd'hui.

** Certaines analyses ou courbes, présentées ici pour mieux illustrer le propos, proviennent, outre de celles de L.Turpin, des 5 sources suivantes :

- Rapport du GIEC de 2001, synthèse à l'usage des décideurs,
- Un nouveau climat, de P.J. Dubois, éditions de La Martinière, oct. 2003
- L'effet de serre, de H. Le Treut et J.M. Jancovici, Champs, Flammarion, février 2004
- L'énergie de demain, J.L. Bobin et altera, EDP Sciences, mars 2005.
- Plaquette « le changement climatique » – ministère de l'écologie et du développement durable, ADEME et MIES (1er ministre), oct. 2003

10

Les grandes entreprises prennent en compte dès aujourd'hui, dans leur stratégie, la perspective de raréfaction du pétrole à 30 ans.