



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable

Directoire : Jean-François Bach et Jean Dercourt
Rédacteur en chef : Dominique Meyer

Comité éditorial :
Christian Amatore
Bernard Castaing
Pascale Cossart
Pierre Encrenaz
Olivier Faugeras
Étienne Ghys
Henri Korn

25 novembre 2009

Table des matières

Avant-propos

Introduction

I - LES ÉVOLUTIONS DU CLIMAT

I-1	Peut-on expliquer simplement ce qu'est l'effet de serre ? Comment en mesure-t-on les conséquences ? Quelles sont-elles en France ?	Hervé Le Treut Michel Petit	pp 1-4
I-2	La question se pose pour certains de savoir s'il y a une modification du climat due aux activités humaines. Si oui, par quoi se traduit-elle ?	Marie-Lise Chanin Vincent Courtillot et Jean-Louis Le Mouël Hervé Le Treut Claude Lorius Michel Petit	pp 4-13
I-3	En France, comment verrions-nous, dans notre vie quotidienne, les effets éventuels d'un réchauffement climatique ?	Jean-Claude André Jean-Louis Le Mouël et Vincent Courtillot Michel Petit	pp 14-18
I-4	La Terre a-t-elle connu, dans le passé, des modifications importantes de température ?	Jean Dercourt	pp 18-20
I-5	La France a vécu dans le passé des événements climatiques extrêmes avec pour conséquences des pollutions. Que peut-on faire pour en diminuer les impacts ?	Henri Décamps	pp 20-22
I-6	Quelle est la crédibilité des modèles mathématiques pour prévoir les changements climatiques éventuels et leurs conséquences ?	Roger Temam Jacques Villain	pp 22-24

II- ENVIRONNEMENT ET OCÉANS

II-1	La hausse du niveau des mers et ses conséquences sur certaines régions côtières basses et peuplées du globe sont souvent citées. Qu'en est-il exactement pour les littoraux de la France ?	Anny Cazenave	pp 24-26
II-2	L'acidification des océans est-elle réelle ? Menacerait-elle la vie marine ?	Anny Cazenave Bernard Kloreg	pp 26-28

III- ENVIRONNEMENT ET ÉNERGIES

III-1	En France, les émissions de gaz à effet de serre ont considérablement diminué avec notre parc de centrales électronucléaires. Comment peut-on améliorer encore les performances et la sécurité de ce parc et de son cycle de combustibles ?	Robert Guillaumont Bernard Tissot	pp 28-31
III-2	Faut-il utiliser des biocarburants, les mélanger avec les carburants fossiles ? Quels en sont les avantages et les inconvénients ?	Sébastien Candel Bernard Tissot	pp 31-33
III-3	Quel sera pour la France l'apport des éoliennes ?	Bernard Tissot	p 34

III-4 a) En Europe : peut-on donner un calendrier de l'utilisation du gaz naturel et du pétrole dans les prochaines décennies ? b) Certaines des nations ayant de fortes réserves de charbon s'impliquent dans la capture des fumées et le stockage du gaz carbonique. Comment ? Quel rôle l'Europe va-t-elle jouer ?	Bernard Tissot Sébastien Candel	pp 35-41
III-5 Tous les grands pays font des progrès constants vers la mise au point de l'énergie photovoltaïque. La France peut-elle accroître son rôle dans ce domaine ?	Marc Fontecave Jacques Friedel Antoine Labeyrie Didier Roux	pp 41-47
III-6 Que pourrions-nous faire en France de plus pour résoudre les problèmes énergétiques et déployer leurs solutions à l'échelle industrielle, soit seuls, soit dans un cadre européen ?	Robert Dautray Jean-Marie Tarascon Bernard Tissot	pp 47-52

IV - ENVIRONNEMENT, DÉMOGRAPHIE, EAU, ALIMENTATION, SANTÉ

IV-1 Quelles vont être les conséquences dans le monde des évolutions démographiques respectives par grandes zones continentales ? La France peut-elle jouer un rôle positif ?	Henri Léridon	pp 52-54
IV-2 L'augmentation de la population mondiale aura pour première conséquence un déficit croissant en eau et une altération parfois importante de l'environnement. Comment va-t-on faire face à ces problèmes ?	Roland Douce Henri Léridon et Ghislain de Marsily	pp 54-58
IV-3 En France, y aura-t-il un déficit en eau dans les deux décennies à venir et, si oui, comment résoudra-t-on ce problème, différent de région en région ? Quelles seront les conséquences pour l'industrie agroalimentaire de la France ?	Ghislain de Marsily	pp 58-60
IV-4 Que peut-on dire des conséquences sur la santé des divers problèmes liés au changement climatique ?	Bernard Meunier Maxime Schwartz Alain-Jacques Valleron	pp 60-66

V - ENVIRONNEMENT, BIODIVERSITÉ

V-1 Quelles sont précisément les menaces que les modifications de l'environnement font peser sur la biodiversité ? Peut-on citer des faits déjà survenus en France ?	Henri Décamps Jean-Dominique Lebreton Yvon Le Maho Maurice Tubiana	pp 67-72
--	---	----------

Avant propos

L'Académie des sciences présente sur son site une nouvelle rubrique destinée au public, intitulée "Libres points de vue d'Académiciens", afin de répondre à des questions concernant des sujets de science et de société.

À l'approche de la Conférence de Copenhague sur le changement climatique en décembre 2009, le premier sujet abordé s'intitule "Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable".

L'Académie des sciences a proposé à différents membres, spécialistes des domaines en jeu, d'exprimer leurs points de vue sur les évolutions du climat, les océans, les énergies, la biodiversité, la démographie et ses répercussions sur l'eau, l'alimentation et la santé.

Ces textes qui expriment, dans l'indépendance de chacun, les points de vue d'Académiciens apportent, par leur richesse et leur diversité, un éclairage scientifique actuel sur l'environnement et le développement durable.

Nous souhaitons rendre hommage à nos consoeurs et confrères qui ont accepté de participer à ce projet et à notre consoeur Dominique Meyer qui l'a conçu et coordonné.

Jean-François Bach et Jean Dercourt
Secrétaires perpétuels de l'Académie des sciences

Introduction

Il apparaît aujourd'hui opportun d'envisager, à la lumière des progrès scientifiques récents, les changements climatiques en cours, leurs conséquences, et les solutions énergétiques afin d'y faire face.

Les évolutions du climat ont pu être suivies globalement depuis une trentaine d'années grâce aux satellites d'observation de la Terre qui ont permis d'intensifier les mesures systématiques, notamment sur les mers et les glaces. Parmi les phénomènes constatés, citons la diminution des débits de fleuves et de rivières, le recul des glaciers, l'intensification de la fonte saisonnière des glaces de mer, les vagues de chaleur en Europe, etc.

L'accroissement de la concentration en gaz carbonique a conduit à limiter la combustion du charbon. Combiné à l'épuisement des ressources de carburants (pétrole et gaz naturel), cela a mené à prévoir leur remplacement progressif par des énergies renouvelables.

L'augmentation des populations humaines, leur urbanisation dans un air de plus en plus pollué, ainsi que les sécheresses liées aux variations du climat, ont amenuisé l'accès de chacun à l'eau douce. Les terres cultivables ont diminué par la détérioration des zones arables. La pauvreté, la pénurie alimentaire, le manque d'assainissement des eaux, les épidémies, ne cessent de s'aggraver et, par voie de conséquence, des écosystèmes terrestres et marins sont progressivement détruits, la situation étant cependant très différente selon les pays et les régions.

Tout ceci rend indispensable de traiter globalement et équitablement le partage des ressources de la Terre et des mers, en sachant que l'arbitrage doit être effectué entre des pays d'exigences différentes. Il en résulte des difficultés à régler les problèmes concrets de l'adaptation au changement global et aux transitions énergétiques.

Ce sont tous ces faits, toutes ces incertitudes, tous ces espoirs autorisés par les incessantes découvertes scientifiques, qui sont abordés dans ces ‘Libres points de vue d’Académiciens sur l’environnement et le développement durable’ ouverts au public. Celui-ci peut, pour des compléments d’information concernant ces sujets, s’adresser au rédacteur en chef (dominique.meyer@academie-sciences.fr) qui transmettra leurs demandes aux auteurs concernés.

Dominique Meyer
Membre de l’Académie des sciences
Rédacteur en chef

Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable

I- LES EVOLUTIONS DU CLIMAT

L'évolution climatique actuelle fait l'objet de très nombreuses mesures la replaçant dans son passé récent et lointain. Nous faisons ici le point de ces travaux scientifiques :

I-1 Peut-on expliquer simplement ce qu'est l'effet de serre ? Comment en mesure-t-on les conséquences ? Quelles sont-elles en France ?

Hervé Le Treut (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'effet de serre est un processus atmosphérique naturel qui modifie la manière dont s'établit l'équilibre radiatif de la planète, c'est-à-dire l'équilibre entre le rayonnement solaire absorbé par la Terre, et le rayonnement thermique infrarouge qu'elle émet (qui partagent la valeur commune de 235 W/m^2). Le physicien Joseph Fourier fut le premier, en 1824, à pressentir le rôle crucial de l'atmosphère dans cet équilibre. L'atmosphère absorbe le rayonnement terrestre émis à la surface du globe, et le réémet pour partie vers l'espace, pour partie vers la surface. En empêchant la planète de se refroidir librement, l'effet de serre impose des températures beaucoup plus chaudes à la planète. La température de surface moyenne de la Terre est actuellement un peu supérieure à 15°C , alors qu'elle serait de -18°C sans l'effet de serre. L'effet de serre tendrait même à provoquer des températures bien supérieures, sans le rôle modérateur du brassage convectif de l'atmosphère.

Le rôle de l'effet de serre peut être illustré par l'exemple simple d'une voiture laissée au soleil, dont les vitres laissent pénétrer le rayonnement solaire, mais retiennent le rayonnement infrarouge émis en retour. L'atmosphère joue cependant un rôle plus complexe que la vitre de la voiture, parce qu'elle constitue une couche absorbante

de près de 20 km d'épaisseur, dont la température varie avec l'altitude, un effet qui module le rayonnement émis vers l'espace. Malgré son rôle majeur, l'effet de serre ne doit paradoxalement rien ni à l'azote ni à l'oxygène. Il résulte entièrement de l'action de composés minoritaires qui représentent moins de 1% de la masse atmosphérique : des gaz que l'on appelle gaz à effet de serre (parmi lesquels : la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone, l'oxyde nitreux, les fréons), les nuages, certaines poussières.

Si la vapeur d'eau, premier des gaz à effet de serre, n'est pas modifiable de manière directe par les activités humaines, parce que son temps de recyclage dans l'atmosphère est très court (1 à 2 semaine(s)), la teneur atmosphérique des autres gaz à effet de serre a subi une augmentation très rapide, qui a commencé avec le début de l'ère industrielle, et s'est encore accélérée après les années 50. Ces évolutions ne seront que lentement réversibles, d'une part parce que les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent à un rythme accéléré, d'autre part parce que leur durée de vie atmosphérique est longue : plus de la moitié du dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère s'y trouve encore après 100 ans, une longévité atmosphérique partagée par l'oxyde nitreux ou la plupart des fréons. La durée de vie du méthane est plus courte (12 ans), mais même dans ce cas l'effet d'accumulation atmosphérique est important. Alors que la teneur des gaz à effet de serre était restée presque inchangée pendant près de 10 000 ans, l'augmentation du CO₂ en quelques décennies a été de 30%, celle de l'oxyde nitreux de 15%, le méthane a été multiplié par plus d'un facteur 2, et certains fréons sont nouveaux venus dans l'atmosphère. 40 ans de mesures atmosphériques depuis l'espace, dans une gamme de longueurs d'onde extrêmement variée, et 40 ans de développement théoriques, de mesures, de modélisations associées, nous ont donné une très bonne maîtrise du calcul des flux radiatifs perturbés par ces différents gaz. Au total, on estime que l'augmentation de l'effet de serre est actuellement de 3 W/m² (calculé avant l'effet de réchauffement qu'elle induit, et qui permet de rétablir l'équilibre radiatif) : cette valeur peut paraître faible puisqu'elle représente 1,5% des échanges d'énergie entre la Terre et l'espace, mais un calcul simple montre que, appliquée à une Terre dont la température est proche de 300 degrés Kelvin, cette variation de l'effet de serre peut provoquer un réchauffement de près de 1°C. Ces valeurs sont importantes : les reconstitutions des variations de température au dernier millénaire montrent des fluctuations qui sont généralement plus faibles, de l'ordre d'une fraction de degré.

La modification de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre voit son effet à la fois diminué par l'émission simultanée d'aérosols réfléchissant le rayonnement solaire, mais aussi immédiatement augmenté par une rétroaction de la vapeur d'eau : plus il fait chaud, plus le niveau de saturation en vapeur d'eau s'élève, ce qui conduit à un effet de serre additionnel, qui double la réponse climatique. Au total, l'augmentation déjà acquise de l'effet de serre est déjà susceptible de créer un réchauffement climatique dont l'amplitude est supérieure aux variations naturelles des derniers siècles, une tendance qui est maintenant confirmée par l'examen attentif des données climatiques disponibles.

Mais c'est bien l'évolution future de cette part anthropique de l'effet de serre, qui pose problème. La durée de vie atmosphérique des aérosols est très brève (quelques semaines), et l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère

se poursuit. La combinaison de ces deux effets rend un réchauffement global de la planète d'ampleur plus grande absolument inévitable.

Cette croissance de l'effet de serre a deux caractéristiques majeures :

(1) Elle est globale, parce que les gaz émis par les uns ou les autres sont mélangés par l'atmosphère de manière rapide (en moins d'un an). Partout sur la planète on retrouve les 5% de gaz émis par la France. La France comme tous les autres pays du monde est exposée aux 95% d'émissions par les autres pays.

(2) Les conséquences de cette perturbation globale se déclinent localement : la croissance anthropique de l'effet de serre provoque et provoquera une perturbation de grande ampleur du système climatique, avec des conséquences régionales très inégalement réparties. Des modèles climatiques plus complexes sont nécessaires pour décrire cette réponse. Ils montrent que la température est appelée à augmenter plus vite dans les régions polaires et sur les continents, que la réponse « hydrique » (la modification des régimes de précipitation) sera au contraire plus forte dans les régions intertropicales, le relèvement du niveau de la mer constituant bien sûr une menace plus spécifique pour les régions côtières. »

Michel Petit (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« On appelle effet de serre l'absorption par certains gaz présents dans l'atmosphère, comme le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde d'azote, d'une partie du rayonnement infrarouge qu'émet une planète dont la température est de l'ordre de quelques centaines de kelvins. L'énergie de ce rayonnement sortant compense celle de la fraction du rayonnement solaire reçu, absorbée par la planète dont la température moyenne s'établit à une valeur permettant cet équilibre. Toutes choses égales par ailleurs, plus l'effet de serre est important, plus la température est forte de manière à compenser l'absorption. La composition naturelle de l'atmosphère terrestre induit un effet de serre sans lequel la température de la Terre serait inférieure d'une trentaine de degrés à celle que nous connaissons et qui a permis le développement de la vie. L'effet de serre n'est donc pas intrinsèquement nocif. Par contre, les hommes ne peuvent changer impunément la composition de l'atmosphère de leur planète, sans en modifier le climat. Dans la pratique, on désigne souvent cet effet de serre additionnel sous le vocable abrégé "d'effet de serre", alors qu'on devrait, en toute rigueur, parler d'effet de serre "additionnel" provoqué par les émissions liées aux activités humaines. Il s'agit d'un phénomène mondial intégré qui n'est pas mesurable localement, les circulations océaniques et atmosphériques redistribuant géographiquement l'énergie thermique.

L'augmentation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote au cours des dernières décennies est un fait que confirment toutes les mesures. Une augmentation de la température moyenne est donc inéluctable et on observe effectivement une croissance moyenne de 0,75 °C depuis la fin du XIX^e siècle, même si sa variation est aléatoire d'une année à l'autre. Le rythme de l'augmentation ne cesse de croître et atteint aujourd'hui l'ordre de grandeur de 0,15 degré par décennie. Ces variations peuvent sembler faibles par rapport aux écarts de température locale dont nous faisons quotidiennement l'expérience. Elles sont cependant très significatives par rapport à l'écart de 6°C de

cette même température moyenne, qui existe entre une période glaciaire durant laquelle l'Europe du nord était couverte d'une couche de glace de plusieurs km d'épaisseur et un optimum interglaciaire, tel que celui que nous vivons.

L'augmentation de température n'est pas uniformément répartie et, en particulier, l'inertie thermique bien connue des océans ralentit la croissance de leur température par rapport à celle de terres émergées. C'est ainsi que la France connaît un accroissement de sa température double de la moyenne mondiale. Les régions les plus septentrionales du globe connaissent une croissance encore plus rapide.

Le réchauffement lié à l'effet de serre diminue avec l'altitude et finit par se traduire par un refroidissement au niveau de la stratosphère. »

I-2 La question se pose pour certains de savoir s'il y a une modification du climat due aux activités humaines. Si oui, par quoi se traduit-elle ?

Marie-Lise Chanin (Correspondant de l'Académie des sciences)

« Les observations des dernières années, depuis celles prises en compte dans le dernier rapport du GIEC, nous confirment malheureusement que la communauté scientifique n'a pas joué les Cassandre et qu'en fait le changement climatique s'accélère comme le montre, pour ne prendre qu'un exemple, l'accélération de la fonte des glaciers à toutes latitudes. La cause de cette accélération est simple à trouver : le changement de la croissance des émissions de dioxyde de Carbone est passé de 1%/an dans les années 90 à plus de 3%/an à partir de 2000. Ce changement assez brutal s'explique par le développement de l'économie des pays émergents, et l'on ne peut que conclure à l'urgence encore plus critique qu'auparavant du développement d'énergie non-carbonée.

Certes le climat de la terre a toujours changé au cours de son histoire sous l'influence de phénomènes naturels autres que l'augmentation du CO₂. Qu'il s'agisse de perturbations naturelles (éruptions volcaniques majeures, variations de l'activité solaire), de cataclysmes comme l'arrivée d'une météorite, ou des changements périodiques de la position de la terre par rapport au soleil, tous ont laissé des traces dans les archives du climat et notamment sur la température de surface. Dans la mesure où la question qui se pose à nous aujourd'hui concerne les changements récents et en cours, oublions les perturbations de longues périodes et regardons celles qui ont pu affecter la température moyenne de la planète au cours des dernières décennies et pour laquelle les données sont d'excellente qualité, qu'il s'agisse des mesures obtenues à la surface des continents et de l'océan ou dans la basse atmosphère par satellite.

Pendant la période récente, l'impact d'une éruption volcanique, comme celle du Mont Pinatubo en 1991, a été observé avec une très grande précision, grâce notamment aux moyens spatiaux : les émissions de poussières dans la stratosphère ont effectivement refroidi la surface d'environ 0.5°C en 1991/92 ; mais cet effet n'a duré qu'un peu plus d'un an. De même les oscillations océaniques quasi-périodiques (El Nino ou la Nina et l'oscillation Nord Atlantique) créent momentanément des changements dans les températures moyennes respectivement plus élevées ou plus

basses, c'est-à-dire qu'elles génèrent une variabilité (un bruit) dans les observations, mais ces variations de courte période n'affectent pas la tendance à long terme.

Le soleil étant la source d'énergie responsable de la vie sur notre planète, l'activité solaire est un paramètre majeur affectant la température et le climat et nous savons qu'elle est variable à toutes les longueurs d'onde et à toutes les échelles de temps. Un des exemples de sa relation avec le climat dans le passé s'est traduit de façon indubitable par le « petit âge glaciaire » qui correspondait à une période de fort minimum d'activité solaire.

Grâce aux instruments très précis dont on dispose aujourd'hui dans l'espace, l'activité solaire a été documentée avec beaucoup plus de précision qu'auparavant depuis 1979. On a ainsi pu déterminer l'amplitude de la variation cyclique d'une période de 11 ans qui correspond à 0.1% de l'intensité solaire totale moyenne. La modulation de la température due à ce cycle de 11 ans (dont on sait qu'elle est très importante dans la haute atmosphère) n'est que très faible au sol (inférieure à 0.1°C en moyenne) et de toute façon ne peut que moduler la température avec une période de 11 ans et non modifier la tendance sur quelques décennies. Mais surtout ce que ces données récentes ont montré c'est que la variation moyenne d'activité solaire au cours des 30 dernières années est très faible et ne correspond au plus qu'à 7% de l'influence de l'augmentation des gaz à effet de serre pendant la même période. Bien que les processus par lesquels l'influence solaire se transmet à la surface ne soient pas encore élucidés, il est difficile de penser que l'augmentation de la température moyenne observée au cours de cette période pendant laquelle les émissions de CO₂ ont augmenté de quelque 80% puisse être attribuable à une augmentation si faible de l'activité solaire.

Quant à prédire l'impact de la variabilité naturelle sur l'évolution future du climat, la variabilité de l'activité solaire et de l'activité volcanique étant imprévisibles, il est impossible de les prendre en compte dans les modèles prédictifs. Par contre l'influence de l'augmentation du CO₂ sur le climat est prévisible et chiffrée avec une confiance suffisante pour s'en inquiéter.

Qui plus est, l'homme ne peut lutter contre les forces de la nature et donc contre les conséquences des phénomènes naturels. Il peut par contre modifier par ses décisions et son comportement ses émissions de gaz à effet de serre. C'est tout l'objet des débats actuels. »

Vincent Courtillot (Membre de l'Académie des sciences) et Jean-Louis Le Mouél (Membre de l'Académie des sciences) :

« Le climat est en général défini comme la moyenne de la météorologie sur environ trente ans. Il est caractérisé par de nombreux paramètres observables : température, pression, précipitations, vents, nébulosité, insolation,... Le paramètre le plus couramment observé et représenté est la température. Il n'est pas si simple de mesurer la température moyenne globale de la basse atmosphère ni de s'assurer qu'elle a bien une signification thermodynamique (les températures ne s'additionnent

pas, contrairement par exemple aux volumes). De plus, les températures moyennes diffèrent considérablement d'une région climatique à l'autre (voir réponse à la question I-3 pour la France) et celles que nous avons recalculées diffèrent sensiblement de celles qui sont représentées dans le rapport 2007 du GIEC (figure 1 de la réponse à la question I-3).

Si l'on admet cependant la validité de la courbe moyenne mondiale publiée sur le site du centre de recherches britannique de Hadley (figure 1), on voit que la température moyenne a crû de 1910 à 1930 environ, décrû de 1940 à 1970, crû à nouveau jusqu'en 1998 qui en marque le maximum, et décrû à nouveau depuis. Cette forme particulière de la courbe ressemble beaucoup plus aux variations de divers indicateurs caractéristiques des variations d'activité solaire qu'à celles de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. La décroissance observée pendant la dernière décennie correspond bien à la décroissance de l'activité solaire, qui semble être rentrée dans une phase plus faible que lors des dernières décennies, et qui pourrait durer plusieurs décennies, comme l'ont observé pour le passé les physiciens du Soleil (de Jager, 2008).

Nous avons multiplié depuis 2005 les études qui font apparaître la présence indiscutable de signaux solaires dans les températures et dans la variabilité des températures en Europe et aux Etats-Unis (figure 2). Nous avons également pu montrer dans les séries les plus longues (plus de deux siècles) de stations comme Prague, Bologne ou Uccle, que le cycle de la température au cours de l'année « sait » parfaitement si l'on est en période de fort ou de faible cycle solaire. Nous avons retrouvé la signature solaire dans une oscillation du système océan-atmosphère qui est importante pour le climat du Pacifique tropical nord, l'oscillation de Madden-Julian. Ces observations, désormais publiées (voir références), semblent bien indiquer que l'influence du Soleil a été sous-estimée et celle du CO₂ surestimée dans les modèles.

Deux articles récents révisent à la baisse la sensibilité de l'atmosphère au CO₂ (Lindzen et Choi, 2009) et les variations de l'irradiance solaire à long terme à la hausse (Scafetta et Willson, 2009) au point de peut-être inverser leurs contributions respectives. Enfin, une ré-analyse des anneaux d'accroissement des arbres (Grudd et al, 2008) confirme que la célèbre courbe en crosse de hockey de Mann est fautive (à cause notamment d'un biais lié à l'épaisseur de ces anneaux en fonction de l'âge de l'arbre) et que les températures actuelles et le réchauffement climatique des 150 dernières années ne sont ni exceptionnels ni exceptionnellement rapides. Quatre ou cinq fois depuis 1500 ans la température moyenne a été aussi élevée, et pendant deux siècles autour de l'an mille nettement plus élevée: on produisait du vin à Londres et les Vikings occupaient un Groënland vert... »

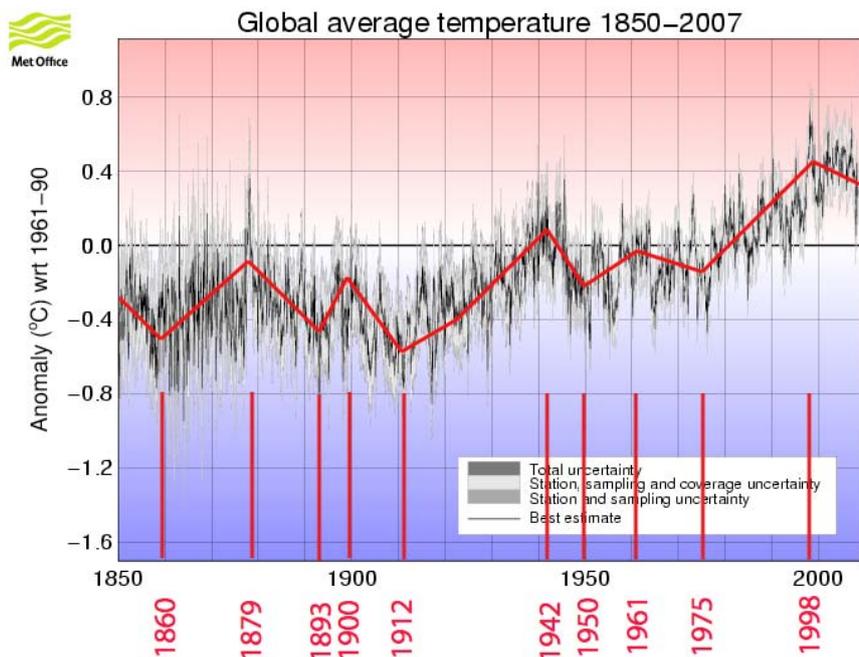


Figure 1 : Température moyenne globale (« anomalie » ou différence par rapport à la moyenne de 1961 à 1990) de la basse atmosphère évaluée par le Hadley Research Center. Echelle en degrés Celsius. La tendance décennale ou multi-décennale indiquée en rouge est indicative seulement et estimée par les auteurs de la présente note.

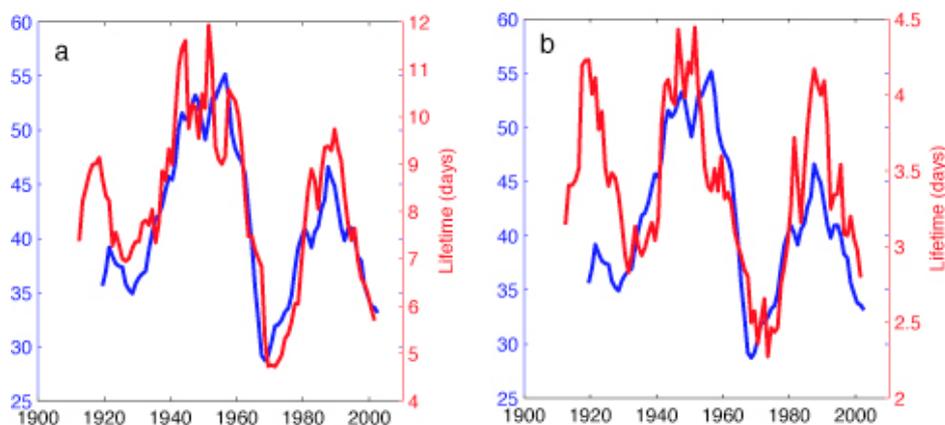


Figure 2 : En rouge la variabilité de la température moyenne (a, à gauche) et de la direction des vents (b, à droite) pendant la saison d'hiver (10 janvier au 20 février) dans les stations météorologiques de Hollande. En bleu, un indicateur de l'activité solaire (la variation quadratique journalière de la composante verticale du champ géomagnétique à Eskdalemuir en Ecosse). (d'après Le Mouél et al, 2009a).

Références :

- Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J.L., Fluteau, F. and Genevey, A., 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth and Planetary Science Letters*, 253(3-4): 328-339.
- Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J.-L., Fluteau, F., and Genevey, A., 2008. Response to comment on "Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265, 308-311.

- Courtillot, V., Le Mouél, J.L., Blanter, E., and Shnirman, M., sous presse, 2009. Evolution of seasonal temperature disturbances and solar forcing in the US North Pacific, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Grudd, H., 2008. Torneetrask tree-ring width and density AD 500–2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers, *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-007-0358-2.
- de Jager, C., 2008. Solar activity and its influence on climate, *Geol. Mijn.*, 87, 207-213.
- Le Mouél, J.L., Kossobokov, V., and Courtillot, V., 2005. On long-term variations of simple geomagnetic indices and slow changes in magnetospheric currents: the emergence of anthropogenic global warming after 1990?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 232, 273-286.
- Le Mouél, J.L., Courtillot, V., Blanter, E. and Shnirman, M., 2008. Evidence for a solar signature in 20th-century temperature data from the USA and Europe. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(7): 421-430.
- Le Mouél, J.L., Blanter, E., Shnirman, M. and Courtillot, V., 2009a. Evidence for solar forcing in variability of temperatures and pressures in Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(12): 1309-1321.
- Le Mouél, J.L., Kossobokov, V., and Courtillot, V., sous presse, 2009b. A solar pattern in the longest temperature series from three stations in Europe, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
- Lindzen, R.S., and Choi, Y.S., 2009. On the determination of climate feedbacks from ERBE data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi: 10.1029/2009GL039628.
- Scafetta, N., and Willson, R.C., 2009. ACRIM-gap and TSI trend issue resolved using a surface magnetic flux TSI proxy model, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05701, doi: 10.1029/2008GL036307.

Hervé Le Treut (Membre de l'Académie des sciences) :

« La température moyenne à la surface de la Terre est-elle un bon diagnostic de l'évolution climatique ? Cela dépend bien sûr du contexte. Il s'agit principalement d'un diagnostic à vocation pédagogique qui permet la présentation simplifiée de résultats, mais ne correspond pas à la pratique des modèles, qui calculent l'évolution de températures distribuées sur le globe, horizontalement comme verticalement.

Le principal problème auquel nous sommes confrontés aujourd'hui est d'arriver à estimer l'importance relative du changement climatique qu'annoncent les modèles pour les prochaines décennies, et des fluctuations naturelles du climat. Nous savons que les deux éléments naturels et anthropiques se superposent déjà, mais que la part de la composante anthropique est appelée à croître dans le futur. La température globale fournit un ordre de grandeur utile, en montrant que le réchauffement des prochaines décennies sera de plusieurs degrés, alors que les fluctuations climatiques des derniers siècles, au mieux de ce que l'on sait les estimer, se chiffrent en dixièmes de degrés (en dépit de leurs conséquences souvent importantes). Il faut remonter à la dernière déglaciation pour trouver trace d'un réchauffement global de plusieurs degrés.

Mais ce diagnostic simple ne suffit pas, et l'analyse des modèles, la validation de leurs résultats concernant le passé, le présent et le futur utilisent toujours des diagnostics beaucoup plus précis. Les études destinées à détecter les premiers

signes du réchauffement dû aux activités humaines, par exemple, se font toujours en utilisant l'ensemble des données tridimensionnelles des différents paramètres météorologiques mesurés de manière régulière (température, mais aussi pression, vent, pluie, humidité, manteau neigeux, composition de l'atmosphère, salinité des ... : en fait une longue liste, qui s'est encore allongée depuis 20 ans avec la systématisation des mesures satellitaires).

Cette analyse utilise des méthodes complexes. Le système climatique subit des variations continues : déterminer la part des fluctuations naturelles organisées, des fluctuations naturelles aléatoires, et (maintenant) des fluctuations d'origine anthropique, en distinguant tant les processus qui sont à leur origine que l'échelle de temps où elles se manifestent, constitue la tâche première des climatologues, et occupe des milliers de personnes en permanence. Il faut distinguer plusieurs étapes dans ce travail :

- (1) le *recueil* des données observées, organisé depuis 1873 par l'Organisation Météorologique Internationale, devenue depuis l'Organisation Météorologique Mondiale. Les données météorologiques sont complétées par des données océanographiques, des données multiples de paramètres de surface, mais aussi des données relatives à un passé plus lointain. L'ensemble a conduit à créer des archives colossales, de données « brutes », non analysées.
- (2) l'*analyse* de ces données, qui assure leur cohérence, et exploite les informations supplémentaires que donnent les équations du mouvement. Il s'agit donc d'utiliser les modèles comme un outil d'analyse objective du système climatique. Cette analyse est effectuée de manière quotidienne pour permettre les prévisions météorologiques, mais aussi les prévisions océanographiques, celles des crues, des systèmes d'alerte sur la chimie atmosphérique, etc. La qualité des prévisions, vérifiable quelques jours plus tard, constitue le meilleur indice possible de qualité des analyses.
- (3) *des réanalyses cohérentes de tout l'historique des données (en fait principalement de la quarantaine d'année pendant lesquelles le système actuel de mesure et de prédiction a été en place)*. Elles sont nécessaires pour étudier l'évolution climatique, c'est-à-dire l'évolution des différents moments statistiques associés à ces données, avec un outil diagnostic invariant. Cette tâche majeure (un cycle de réanalyse réclame plusieurs années de calcul sur les plus gros ordinateurs actuellement disponibles) est effectuée de manière régulière au Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, dans plusieurs centres de recherche américains, et dans plusieurs autres centres spécialisés.
- (4) *La recherche des différents modes de fluctuations climatiques*. Elle utilise des techniques statistiques extrêmement variées, qui peuvent être purement statistiques, s'appuyer sur les propriétés dynamiques des écoulements, s'envisager à l'échelle globale, être déclinées de manière régionale. Il est impossible de donner un aperçu même résumé de ces travaux dans le cadre de ce petit paragraphe, mais il est essentiel de savoir qu'ils existent et occupent une fraction importante de la communauté des chercheurs en climatologie.

Ces études ont permis de mettre en évidence des modes climatiques nombreux : l'ENSO (El-Niño-Southern Oscillation), l'ONA ou NAO (Oscillation Nord Atlantique) sont les plus célèbres, mais il en existe beaucoup d'autres. Une tradition

météorologique ancienne, initiée au début du XX^e siècle par le climatologue anglais Sir Gilbert Walker, consiste à décrire ces modes au travers d'indices : les calculs effectués à l'ère moderne ont confirmé, près d'un siècle plus tard, la pertinence d'indices définis par Walker : l'indice de l'oscillation australe (pression à Tahiti moins pression à Darwin) ou de l'indice de l'ONA (pression à Reykjavik moins pression à Lisbonne).

On peut de la même manière considérer la température moyenne à la surface de la Terre comme un indice, décrivant la part des fluctuations du système climatique qui ont un impact planétaire. La température de surface est calculée à partir d'un ensemble de mesures au sol (bouées, bateaux, stations météorologiques), qui sont depuis quelques décennies complétées et mises en synergie par des données satellitaires. Les mesures satellitaires sont beaucoup plus précises sur les océans que sur les continents, ce qui permet de couvrir l'Hémisphère Sud de manière correcte. Les systèmes d'analyse évoqués plus haut permettent de vérifier la cohérence de l'estimation des températures de surface avec celle des autres paramètres météorologiques. On peut vérifier que l'indice « température moyenne à la surface » rend effectivement compte des évolutions à moyen terme du climat (quelques décennies et au delà), et qu'il est aussi sensible aux modes organisés des variations climatiques qui se manifestent à plus courte échelle de temps. Il est donc raisonnable d'étendre l'usage de cet indice à des périodes bien plus longues que les dernières décennies, et de s'en servir comme d'un descripteur (partiel) des évolutions climatiques à l'échelle des siècles, des millénaires ou centaines de milliers d'années.

Au cours des dernières années la température moyenne à la surface de la Terre a connu une augmentation progressive à laquelle se superposent des événements plus ponctuels. En 1998, un événement El Niño d'amplitude exceptionnelle s'est traduit par des températures moyennes très élevées, suivies bien sûr dans les années suivantes par un refroidissement relatif. Ces évolutions seraient impossibles à interpréter si elles n'étaient pas accompagnées d'études plus précises, visant à faire la part des différents modes climatiques y participant. Les études de détection du changement climatique vont un pas plus loin, en cherchant à déterminer si, dans un espace statistique orthogonal à celui des variations naturelles du climat, des évolutions ont lieu dans le sens des changements attendus en réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre (tels que les simulent les modèles). Ce sont ces études, et non l'inspection visuelle de la courbe du réchauffement moyen de la planète, qui permettent d'affirmer désormais avec une quasi-certitude qu'un changement est en cours, et, avec une certitude à peine moindre, qu'il est attribuable aux activités humaines. Ces mêmes études constituent aussi une validation de fait de la prévision des évolutions climatiques futures par les modèles. »

Claude Lorius (Membre de l'Académie des sciences) et Jean Jouzel LSCE/IPSL (CEA-CNRS)

« La température moyenne à la surface de la Terre est déterminée à partir de moyennes mensuelles qui combinent les valeurs journalières de la température dans des milliers de stations continentales avec celles de la surface de la mer réalisées à partir de milliers de navires sillonnant les océans. Pour chacun des sites, on utilise comme référence la période allant de 1961 à 1990, en prenant bien soin de corriger différents biais liés à des changements d'instrument et de méthode de mesure ou à des modifications de l'environnement de la station liées, par exemple, à l'urbanisation. A partir de ces données on caractérise un maillage géographique couvrant, par exemple, 5° en latitude et longitude. Trois équipes, une anglaise et deux américaines, produisent ces données sur la température moyenne à la surface de la Terre. Leurs approches diffèrent essentiellement par les méthodes d'interpolation spatiale utilisées et par la façon de prendre en compte les périodes pour lesquelles certaines séries de mesures sont interrompues, comme cela a été le cas durant les première et seconde guerres mondiales.

On peut ainsi remonter jusqu'aux années 1850 avec cependant une couverture géographique qui est loin d'être globale dans la seconde partie du XIX^e siècle. Elle est de très bonne qualité depuis 1957 date à laquelle ont commencé les mesures en Antarctique et plus encore depuis 1980, avec le début des mesures satellitaires. Les estimations des valeurs moyennes annuelles (2 écarts types) sont donc plus précises de nos jours (~ 0.1°C) qu'au début du XX^e siècle (~ 0.2°C). En tenant compte de toutes les sources d'incertitude, les tendances observées depuis une centaine d'années sont tout à fait significatives indiquant un réchauffement moyen de 0.74 ± 0.18 °C entre 1906 et 2005, et de 0.64 ± 0.13 °C entre 1956 et 2005.

Quelles sont les parts respectives de la variabilité naturelle du climat et de celle due à l'Homme ?

Faire la part de ce qui est dû à la variabilité naturelle de notre climat - qui a toujours existé et existera toujours - et de ce qui résulte des activités humaines est une des questions importantes abordée dans les rapports successifs du GIEC. Grâce à l'accumulation de nouvelles données, à l'amélioration des modèles climatiques et à une meilleure connaissance des causes naturelles de la variabilité, le 4^{ème} rapport publié en 2007 apporte une réponse claire. Il y a moins de 10 chances sur 100 que le réchauffement tel qu'il a été observé depuis le milieu du XX^e siècle soit uniquement d'origine naturelle ; en fait, sur cette période, les variations combinées de l'activité solaire et de celle des volcans auraient plutôt contribué à un refroidissement. A l'inverse, il est très probable (plus de neuf chances sur dix) que l'essentiel de ce réchauffement résulte de l'augmentation de l'effet de serre liée aux activités humaines. Le refroidissement récent observé dans la stratosphère est l'un des arguments clés de cette conclusion ; il est en accord avec un réchauffement de la planète lié à l'effet de serre alors qu'à la fois stratosphère et surface auraient dû se réchauffer s'il était dû à l'activité solaire.

Cette variation moyenne de température est-elle un bon indicateur de ce changement climatique ? Quelles en sont les conséquences ? ,

La température moyenne est un bon indicateur du réchauffement. Le diagnostic du GIEC selon lequel "le réchauffement est sans équivoque" s'appuie de plus sur un ensemble

d'observations complémentaires : réchauffement observé dans la moyenne atmosphère et dans la profondeur des océans, rythme de la fonte des neiges et des glaces, élévation du niveau moyen de la mer, augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère....

D'autres variables climatiques sont à prendre en compte lorsque l'on passe de la notion de "réchauffement" à celle, plus large, de "changement climatique". Celles-ci concernent l'importance des précipitations, la salinité de l'océan, les vents, la circulation atmosphérique et les événements extrêmes incluant sécheresses, précipitations intenses, inondations, vagues de chaleur et cyclones tropicaux. Notre environnement est également affecté que ce soit sur les continents (période de gel des lacs et rivières, dates de floraison et des vendanges, domaines de développement de la faune et de la flore) ou sur les océans (habitats modifiés de certaines espèces d'algues, de plancton ou de poissons que l'on peut associer avec une grande confiance au réchauffement des eaux océaniques et aux variations d'autres paramètres tels que couverture de glace, salinité, circulation océanique et teneur en oxygène). »

Michel Petit (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« Comme chacun sait, le système climatique est affecté de variations aléatoires d'un jour à l'autre. D'une année à l'autre, les hivers restent plus froids que les étés, mais certains hivers sont plus froids que d'autres et certains étés plus chauds que d'autres. Pour avoir une valeur statistiquement significative, il faut faire des moyennes dans l'espace sur l'ensemble du globe et dans le temps sur plusieurs décennies (30 ans de façon usuelle). La moyenne dans l'espace est faite à partir du réseau mondial des stations météorologiques terriennes et des satellites météorologiques. Bien entendu, les stations terriennes ne sont pas uniformément réparties à la surface du globe et leur moyenne est pondérée en conséquence. Quand on cherche à évaluer la température moyenne dans un passé où le réseau mondial n'existait pas encore, on doit faire appel à des indicateurs dont un des plus puissants est la composition des bulles d'air, d'âge pouvant atteindre un million d'années, qu'on retrouve emprisonnées dans les calottes glaciaires des régions polaires à des profondeurs de l'ordre de plusieurs kilomètres.

Le climat de la Terre évolue sous l'influence de causes naturelles qui ont toujours existé et continueront à jouer un rôle.

- tout d'abord, la Terre ne tourne pas toujours de la même façon autour du Soleil, à cause de l'attraction des autres planètes et de la Lune : l'axe de rotation autour duquel la planète tourne sur elle-même en un jour est plus ou moins incliné par rapport au plan dans lequel elle accomplit sa rotation annuelle autour du Soleil, l'aplatissement de l'ellipse qu'elle décrit dans ce plan est plus ou moins marqué, le mois au cours duquel la Terre est au plus près du Soleil varie régulièrement. Toutes ces variations se produisent lentement, avec des périodes qui se mesurent en dizaines de milliers d'années. Elles provoquent des changements dans la manière dont le Soleil éclaire notre planète de l'angle et sont à l'origine des grands cycles glaciaires interglaciaires qui ont une amplitude de l'ordre de 6 °C et une période de 100 000 ans. Nous sommes depuis 10 000 ans dans une période interglaciaire, donc

chaude, qui ne devrait s'achever que dans plus de 30 000 ans.

- le Soleil connaît lui-même une variabilité qui se manifeste en particulier par la présence de taches dont le nombre varie avec un cycle de 11 ans. Toutefois, ce cycle affecte le rayonnement solaire essentiellement dans la gamme de l'ultraviolet et son influence est évidente sur le comportement des parties les plus élevées de l'atmosphère terrestre qui l'absorbent : ionosphère (altitude de 100 km et au-delà) et, dans une moindre mesure, stratosphère (altitude d'environ 30 km). Il n'affecte que peu l'énergie totale rayonnée et son influence est détectée, mais très faible dans les phénomènes climatiques. Des variations à long terme du rayonnement total, comme un accroissement depuis le minimum, dit de Maunder, observé à la fin du XVII^e siècle dans le nombre de taches solaires, sont possibles, mais d'amplitude très inférieure à celle du cycle de 11 ans qui n'est pas visible dans la température au niveau du sol et ne sauraient expliquer les variations du climat, au cours des dernières décennies. Depuis quelques décennies, les satellites permettent une mesure directe du rayonnement solaire dont la variation reste faible. De plus, on ne voit pas par quel mécanisme une augmentation du rayonnement solaire pourrait expliquer que le réchauffement récemment observé du climat décroisse avec l'altitude jusqu'à devenir un refroidissement au niveau de la stratosphère.

- un autre paramètre jouant un rôle sur la température au sol est l'activité volcanique. Lors des fortes éruptions volcaniques, des poussières atteignent la stratosphère (au-dessus de 15 km d'altitude) et peuvent y rester pendant une ou deux années avant de retomber vers le sol. Ces particules constituées essentiellement d'oxydes de soufre jouent un rôle d'écran pour le flux solaire incident, ce qui a pour effet de refroidir la surface. Lors de la dernière grande éruption du mont Pinatubo en 1991, un tel refroidissement de 0,5 °C a été observé sur une grande partie de la planète. Mais ces effets sont de courte durée (1 à 2 ans). Ils représentent seulement une source de variabilité, mais ne peuvent expliquer la montée des températures que l'on observe de façon quasi continue au cours des 30 dernières années.

Les activités humaines ont, depuis le début de l'ère industrielle, ajouté à ces causes naturelles de nouvelles causes de variation liées au changement de la composition de l'atmosphère qu'elles induisent : l'effet de serre additionnel qui est le seul à expliquer quantitativement les observations des trente dernières années, comme le montrent les modélisations actuelles du climat qui prennent en compte l'ensemble des phénomènes naturels et des phénomènes anthropiques.

La variation de la température moyenne est le meilleur des indicateurs du changement climatique mondial. Ce paramètre, pour significatif qu'il soit, ne doit pas faire oublier l'existence de variations géographiques importantes et de variations des précipitations dont l'importance pour les écosystèmes et l'humanité ne doit pas être sous-estimée. L'augmentation de température entraîne une lente montée du niveau de la mer en raison d'une part de la dilatation de couches de plus en plus profondes de l'océan et d'autre part de la fonte des glaces de terre. Cette montée se poursuivra pendant des siècles, même si la température est stabilisée. »

I-3 En France, comment verrions-nous, dans notre vie quotidienne, les effets éventuels d'un réchauffement climatique ?

Jean-Claude André (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« Il faut distinguer deux niveaux de réponse à cette question : d'une part la perception du réchauffement que peut, ou ne peut pas, avoir une personne ne disposant que de sa propre perception des températures, et d'autre part la réalité du réchauffement telle qu'elle ressort des mesures spécialisées des climatologues.

La perception individuelle est limitée par la portée de la mémoire et par la trace qu'y laissent certains événements plus ou moins exceptionnels. Le réchauffement climatique s'apprécie sur des durées de plusieurs décennies, ce qui est tout juste compatible avec la durée de vie de la plupart des Français ! L'expérience commune peut donc être biaisée par un hiver particulièrement doux ou au contraire rigoureux, ou par un été particulièrement chaud ou au contraire frais, sans que la tendance lente sur 50 ans n'y laisse de trace !

Les enregistrements climatiques sont quant à eux de nature quantitative. Ils montrent par exemple, sur la période 1951-2000, que le nombre de journées dites estivales (c'est-à-dire avec une température supérieure à 25°C), a augmenté dans 90 % des stations de mesure disposées sur le territoire national. Ils montrent qu'il y a 4 journées de gel en moins tous les 10 ans dans le sud (station de Toulouse) et 5 journées en moins dans le nord (station de Nancy). Ils indiquent aussi que l'enneigement de moyenne montagne (altitude entre 500 et 1500 m) diminue, avec, tous les 10 ans, 1 semaine de moins avec de la neige au sol et 2 semaines de moins avec un enneigement supérieur à 1 m. Ils montrent d'autre part que nombre d'oiseaux migrateurs restent en France en hiver au lieu de partir vers le sud, ou encore que les dates de floraison des arbres fruitiers, ou les dates de vendanges, sont de plus en plus précoces. Tous ces indicateurs sont régulièrement suivis sur le site de l'ONERC¹.

Qu'est-ce qui prouve que le réchauffement climatique est dû à l'augmentation de l'effet de serre ?

Il est possible de montrer que beaucoup des effets décrits ci-dessus sont significatifs du point de vue statistique, c'est-à-dire ne relèvent pas de fluctuations naturelles affectant le climat d'une année à l'autre : il s'agit d'un signal véritable et non plus du bruit de variations plus ou moins erratiques. Il faut par contre faire appel à la modélisation du climat pour déceler l'explication de ce signal. Seuls les modèles climatiques complexes, qui prennent en compte tous les mécanismes atmosphériques et océaniques, de nombreuses interactions avec les autres milieux et phénomènes (soleil, végétation et biosphère, volcanisme...) sont susceptibles de mettre en relation de façon convaincante et quantifiée "causes" et "effets". Ce sont eux qui démontrent que le réchauffement du climat actuel et futur est induit par l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, ..).

¹ Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique
(<http://onerc.org/listAllIndicators.jsf>)

Quelle est la région la plus touchée par ce changement climatique et de quelles manières ?

A l'échelle globale ce sont les régions de haute latitude qui connaissent, et connaîtront, le réchauffement le plus important. A échelle plus régionale, cette grande tendance est modulée par des effets plus locaux comme la plus ou moins grande proximité de masses océaniques ou montagneuses. Ainsi, pour la France, c'est le sud-ouest qui, au cours du XX^e siècle et en moyenne, s'est réchauffé plus rapidement que les autres régions. Les différences interrégionales sont cependant faibles (quelques dixièmes de degré). Pour des paramètres plus fins comme la température minimale de fin de nuit, c'est l'ouest qui s'est réchauffé davantage que l'est ; pour les températures maximales diurnes, c'est le sud qui s'est plus réchauffé que le nord.

Y a-t-il des sécheresses nouvelles visibles dans le Sud ?

Il y a effectivement une tendance à l'assèchement des sols, en particulier de février à avril, c'est-à-dire pendant la période où les pluies en principe plus abondantes permettent de recharger les nappes phréatiques (ceci apparaît par exemple grâce à des études de reconstitution de la quantité d'eau contenue dans les sols au cours des 50 dernières années, de 1958 à 2008).

Cela frappe-t-il l'agriculture ?

L'agriculture est affectée par cet assèchement des sols, et ceci d'autant plus que la demande en eau d'irrigation augmente ! C'est ainsi, par exemple², qu'en 2005, l'anticipation de la réduction de la ressource dès le mois de février a conduit à la mise en place d'assolements intégrant cette perspective et à une réduction des surfaces en maïs grain de 8 % en moyenne nationale. Au plan national, il était attendu un rendement inférieur d'environ 10 % pour le maïs irrigué. La sécheresse a pu entraîner des pertes allant jusqu'à 30 à 40 % dans certains départements, et 40 départements ont été reconnus éligibles aux calamités agricoles concernant les récoltes fourragères.

Les incendies de forêts ont-ils augmenté ?

Il n'est pas possible à l'heure actuelle de répondre à cette question de façon définitive, en particulier quant au lien possible entre augmentation du nombre de feux de forêts et réchauffement climatique. Des études viennent d'être lancées pour rassembler des éléments de réponse.

Jean-Louis Le Mouël (Membre de l'Académie des sciences) et Vincent Courtilot (Membre de l'Académie des sciences)

« Pour ce qui est de la France, ou (parce que la réponse climatique y est voisine) de l'Europe occidentale, regardons d'abord le passé récent, jusqu'à la période actuelle. Les courbes en noir de la partie haute de la Figure 1 montrent

² Source INRA (Institut National de la Recherche Agronomique)

l'évolution de la température moyenne en Amérique du Nord (à gauche) et en Europe (à droite) d'après le rapport du GIEC (fondées sur les données du Hadley Research Center). Ces courbes sont assez semblables, avec une croissance jusqu'en 1940, une décroissance de 1940 à 1970 et une forte croissance ininterrompue depuis. Les données brutes étant hélas inaccessibles, nous avons recalculé ces courbes moyennes en partant des données de température minimale, moyenne et maximale journalières de 44 stations en Europe et 150 aux Etats-Unis. Ces données plus complètes (Figure 1 en bas) ne donnent pas vraiment la même image que celles du GIEC. En Amérique du Nord, par exemple, le refroidissement de 1940 à 1970 a eu la même ampleur que les deux périodes de réchauffement qui le précèdent et le suivent. On comprend pourquoi les articles de journaux évoquaient au début des années 1980 (de manière alarmiste, comme souvent) la crainte d'un retour vers un nouvel âge glaciaire (démenti rapidement, et dont les temps caractéristiques ne sont pas les mêmes...). Après 30 ans de réchauffement, on comprend que certains extrapolent et s'inquiètent d'une terre surchauffée...

En Europe, la courbe n'a pas du tout la même allure. La tendance qu'on décèle derrière des variations plus rapides et assez amples (avec par exemple un refroidissement considérable mais bref en 1940), c'est l'absence de toute évolution entre 1910 et 1987 (ni réchauffement, ni refroidissement), puis un saut brusque d'environ un degré Celsius vers 1987, et depuis un nouveau plateau. Cette courbe en marche d'escalier ne ressemble guère à celle du GIEC, ni à celle des Etats-Unis, ni à celle de l'évolution du CO₂. Quel seuil critique a donc été franchi vers 1987 qui fait sauter le climat européen d'un état stable à un autre, certes plus chaud ? La signature du réchauffement est donc régionale. Pour ce qui est de la France, des indicateurs agricoles confirment cette évolution. C'est ainsi que la date de floraison des poiriers a été stable (avec de fortes variations autour de cette moyenne stable, comme la courbe de température de la figure 1 en bas à droite) jusqu'en 1987, et a avancé de deux semaines vers cette période, mais n'a plus évolué sensiblement depuis, en bon miroir de la température européenne moyenne (ou de celle de la France qu'on peut trouver sur le site de Météo-France ; voir Figure 2).

Pour ce qui est des causes de ces évolutions, on se reportera à notre réponse à la question I-2. Nous y expliquons qu'à notre avis l'influence du CO₂ a été surévaluée et celle du Soleil sous-évaluée, sans qu'il soit encore possible d'en donner des estimations quantitatives précises. Nous pensons que les incertitudes restantes dans l'étude de ce problème complexe qu'est l'évolution du climat ont été très sous-évaluées. Les prévisions sont d'autant plus incertaines. Il faut souligner l'extrême variabilité du climat dans l'espace et dans le temps. Et naturellement les prédictions dépendent de la compréhension que l'on a des causes du phénomène. Si le Soleil est bien (comme il l'a été depuis des milliards d'années et à toutes les échelles de temps) un déterminant majeur du climat de la Terre, on comprend mieux la décroissance de la température à l'échelle globale depuis une dizaine d'années, en liaison avec une décroissance de l'activité solaire. Certains physiciens du Soleil pensent qu'il vient de passer dans un mode de fonctionnement plus modéré qu'au cours des dernières décennies, et la baisse des températures pourrait se poursuivre quelques décennies, pour nous ramener peut-être (à l'échelle globale) aux températures des années 70... Quant à l'évolution à l'échelle de la France, elle est très difficile à évaluer, au vu de la variabilité régionale observée au cours du siècle qui vient de s'écouler. Bref, le climat devrait continuer à évoluer, avec des constantes de temps d'une à quelques dizaines d'années, tantôt vers le haut, tantôt vers le bas.

Savoir si l'accumulation poursuivie du CO₂ déclenchera un réchauffement anormal dans les années qui viennent est un sujet de recherche important. Mais dire que ce réchauffement anormal a déjà commencé, et ce avec un seuil de confiance de 90% comme le dit le rapport du GIEC aux décideurs politiques, ne nous semble compatible ni avec la complexité du problème, ni avec les nombreuses observations qui semblent indiquer d'autres causes. Savoir si les évolutions climatiques sont une bonne ou une mauvaise chose, où et pour qui, est un problème distinct, qu'il vaudrait mieux ne pas mélanger sans précaution avec l'analyse scientifique de faits. »

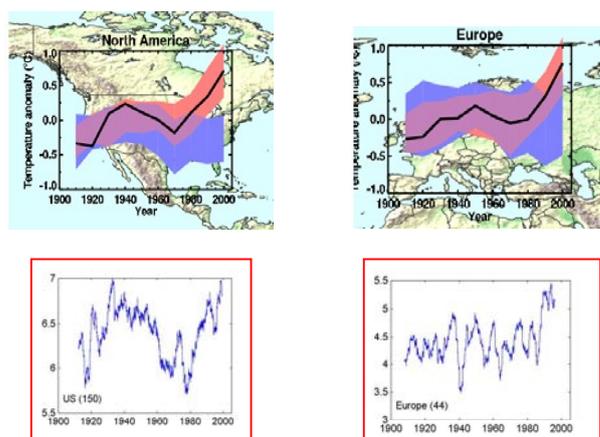


Figure 1 : en haut, en noir, températures moyennes « observées », en bleu prédictions des modèles en l'absence de gaz à effet de serre, en rose prédictions avec effet de serre ; en bas nos courbes moyennes correspondantes. (d'après Le Mouél et al, 2008).

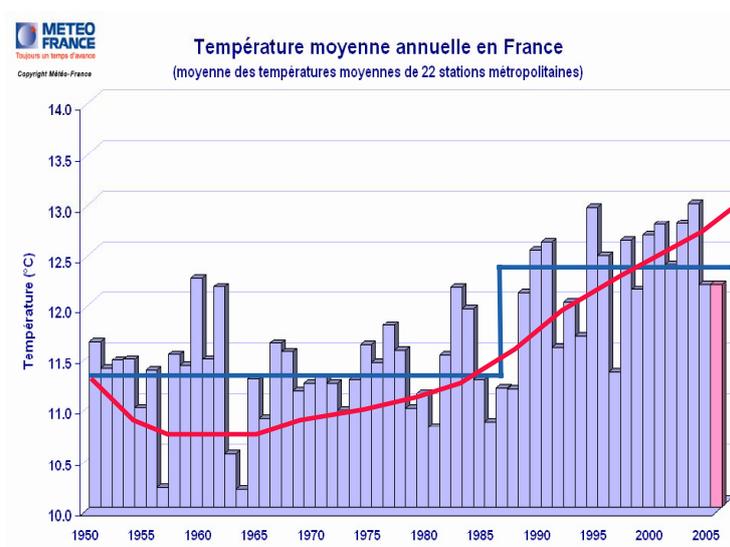


Figure 2 : Température moyenne annuelle en France de 1950 à 2005 (source Météo-France). Deux tendances multi-décennales sont indiquées grossièrement. Celle en rouge correspond à la représentation commune du réchauffement climatique (type « GIEC »), celle en bleu à l'interprétation

« en marche d'escalier » suggérée par la moyenne européenne de la figure 1. Il n'est pas simple de trancher « mathématiquement » entre les deux...

Références (voir question I-2)

Michel Petit (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« Les variations aléatoires du système climatique rendent délicate l'attribution de phénomènes locaux à une cause générale. En ce qui concerne la France, les sources de préoccupation concernent plutôt l'avenir que le présent, l'amplitude du changement climatique passé étant faible par rapport à celle qu'on redoute. En outre, les conséquences les plus sérieuses dans un pays à forte capacité d'adaptation comme le nôtre sont de nature géopolitique et viendront vraisemblablement de l'extérieur, en particulier sous forme de pressions migratoires venant de pays moins développés.

On peut cependant noter les observations suivantes qui sont cohérentes avec le changement climatique mondial, lui-même très vraisemblablement lié à l'effet de serre anthropique : recul des glaciers, croissance du nombre de journées estivales partout (4 jours tous les 10 ans à Paris, 5 à Toulouse), décroissance du nombre de jours de gel (4 jours à Toulouse tous les 10 ans, 5 à Nancy), date des vendanges à Châteauneuf du Pape (avance de 3 semaines en 50 ans, avec une accélération du phénomène depuis les années 1990), extension vers le nord de la zone de présence de la chenille processionnaire du pin qui, progressant au rythme de 5 km par an, atteint le sud du Bassin parisien.

Les régions les plus menacées à terme par le changement climatique sont vraisemblablement les régions de montagne à cause du tourisme hivernal affecté par le manque de neige, les régions méditerranéennes à cause de la sécheresse et d'une moindre attractivité pour le tourisme estival et la Camargue à cause de la montée du niveau de la mer. »

I-4 La Terre a-t-elle connu, dans le passé, des modifications importantes de température?

Jean Dercourt (Membre de l'Académie des sciences) :

« Les variations du climat ont pu être mises en évidence dans les séries géologiques formées durant les périodes de l'histoire de la Terre où existèrent des calottes glaciaires aux pôles (au permo-carbonifère, à l'ordovicien et au précambrien). Des forages dans la calotte glaciaire antarctique actuelle ont permis, par l'étude des isotopes de l'oxygène de la glace et la composition des bulles d'air emprisonnées (CO₂ et méthane), de déceler 4 cycles climatiques successifs en 400 000 ans (époque à laquelle l'Homme savait utiliser le feu). Chaque cycle comporte un minimum thermique (importante glaciation polaire, niveau marin bas) et, par étapes,

irrégulières mais en général assez rapides, atteint un maximum thermique (fonte de la banquise arctique, élévation concomitante du niveau marin). Le cycle s'achève par un retour à une période froide, lui aussi irrégulier mais beaucoup plus lent. Ainsi défini, on peut dire que le cycle actuel a commencé il y a 30 000 à 20 000 ans ; le niveau moyen des océans était alors à -120 mètres par rapport à l'actuel, la calotte glaciaire arctique atteignait la région de Londres et de Bruxelles, etc. La remontée de la température se fait par étapes, chacune marquée par une phase froide à laquelle succède une phase plus chaude. Les données géologiques, archéologiques et même historiques pour les plus récentes, le mettent en évidence. Pour les périodes plus récentes, où la résolution est meilleure, on distingue des cycles dont les périodes (ou pseudo-périodes) sont de l'ordre de quelques siècles. On reconnaît ainsi une période froide au début du Moyen-âge passant progressivement, du XII^{ème} au XIV^{ème} siècle, à une période chaude (l'optimum climatique médiéval) suivie à nouveau d'un refroidissement fort (le petit âge glaciaire) aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. A partir des années 1840, très progressivement, la température croît à un rythme irrégulier qui a été assez élevé du début du XX^{ème} siècle aux années 1930-1940, et à nouveau entre 1970 et 2000.

La variabilité du climat est donc un phénomène toujours présent dans l'histoire récente et ancienne de la Planète.

Les causes de cette variabilité sont l'objet de recherches scientifiques importantes. Le système climatique est extrêmement complexe et associe l'activité du soleil et des autres planètes, d'une part, des diverses enveloppes de la planète, d'autre part, et met ainsi en jeu :

- 1) les rythmes astronomiques (cycles de Milankovitch) ;
- 2) les variations de l'énergie solaire ;
- 3) la dynamique des enveloppes terrestres et, en particulier des enveloppes fluides : celle de l'atmosphère (où sont présents les gaz à effet de serre) et de l'océan naturellement, mais aussi peut-être celle du milieu liquide dans le noyau qui entretient le magnétisme de la Planète ;
- 4) bien d'autres effets encore comme l'abondance des nuages (liée au cycle de l'eau, principal gaz à effet de serre et le moins bien pris en compte dans les modèles), le rôle des rayons cosmiques et des émissions volcaniques ...

Alors que le rôle du Soleil avait fait l'objet de nombreuses études, celui-ci n'est que peu considéré actuellement. En revanche, le rôle des gaz à effet de serre (vapeur d'eau, CO₂ et méthane, ...) a été particulièrement souligné à partir des moyens technologiques et de concepts théoriques novateurs (modélisations). Ainsi, certaines variations climatiques, principalement les plus récentes, leur ont été attribuées. Il me semble que les autres causes sont négligées ou très insuffisamment travaillées, rendant ainsi incomplète la compréhension du système climatique, un système non linéaire très complexe. Il s'agit de comprendre le rôle de chacune des causes du réchauffement climatique actuel, ainsi que celui de l'ensemble des variations antérieures.

Il importe, désormais, de déterminer si les gaz à effet de serre expliquent seuls l'élévation thermique rapide du cycle actuel qui serait, alors, liée seulement à l'activité humaine.

Il est indéniable que l'augmentation de la population mondiale et des activités industrielles et agricoles entraîne un accroissement de ces gaz à effet de serre. Toutes les mesures prises pour diminuer la pollution qui en découle sont bienvenues. En revanche, attribuer l'augmentation de la température aux gaz à effet de serre principalement ou à eux seuls mérite que toutes les autres causes soient examinées avec autant d'études et d'attention que la communauté scientifique a portées à ces gaz. Affirmer que cette lutte contre la pollution interviendra pour éviter l'élévation des niveaux des mers, réguler l'extension des déserts, stabiliser les zones écologiques, etc., est une toute autre affaire. Il serait prudent de ne pas leurrer les peuples des zones les plus en danger. Pour ce faire, il importe que la communauté scientifique internationale et les décideurs de la politique mondiale étendent leurs préoccupations à l'ensemble des causes décelées, d'une part, et à une étude approfondie des cycles thermiques antérieurs. Ceci permettrait d'évaluer de manière plus rigoureuse les incertitudes qui subsistent, incertitudes sans lesquelles il n'est pas de travail scientifique utilisable et qui semblent pour l'instant n'avoir pas été suffisamment étudiées. N'oublions pas que le climat actuel n'est que celui du dernier cycle climatique ayant affecté la Planète depuis plusieurs millions d'années. »

I-5 La France a vécu dans le passé des évènements climatiques extrêmes avec comme conséquences des pollutions. Que peut-on faire pour en diminuer les impacts ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences) :

« Les eaux de pluie se chargent en polluants par contact avec l'air et par ruissellement sur les surfaces imperméabilisées, en ville comme à la campagne : chaussées, aires de parking, toits des bâtiments. Parmi ces polluants figurent des hydrocarbures, du plomb, des métaux lourds provenant de la circulation automobile, mais aussi des déjections animales, des déchets rejetés dans les bouches des égouts, et divers produits apportés par lessivage de la végétation (azote, phosphore, pesticides, herbicides). De plus, l'acidité de la pluie lui confère un fort pouvoir de dissolution.

En ville, une partie de ce ruissellement peut être capturée, filtrée et traitée au moyen de systèmes mis en place pour compenser l'imperméabilisation des sols. Les solutions consistent en bassins de rétention ou d'infiltration, en chaussées poreuses intégrées à la voirie, en fossés orientant les écoulements, en tranchées de stockage ou d'infiltration placées dans les trottoirs ou sous les allées piétonnes, en toits recouverts de végétation sur les maisons et les immeubles. Des « jardins pluviaux » peuvent être aménagés dans des dépressions peu profondes, sur des sols perméables, pour accueillir les eaux de pluie et les infiltrer dans le sol. En milieu rural, les pratiques culturales peuvent permettre de stocker l'eau dès le haut des bassins versants, de freiner et d'étaler le ruissellement via un réseau de talus, de haies, de prairies, prés et fossés inondables, évitant ainsi des pointes de débit polluant en aval.

Lutter contre cette pollution consécutive aux précipitations demande des efforts constants de vérification, d'entretien, de maintenance et de nettoyage tant des

bouches des égouts que des déversoirs, des branchements et des raccordements. Des efforts de surveillance sont aussi indispensables, à partir de pluviomètres, de capteurs, de préleveurs, afin de collecter les quantités d'eau tombées, les conditions d'écoulement, les pollutions déversées, les débits traités – toutes données nécessaires à la gestion des eaux pluviales. Des modélisations doivent permettre d'établir des scénarios de crise et de dresser des cartes prédictives de débordement ou de mise en charge du réseau selon l'intensité des épisodes pluvieux. Un pilotage automatique des écoulements dans le réseau doit pour sa part permettre de gérer les flux en temps réel et d'éviter les débordements.

Indépendamment des pluies, les inondations entraînent dans leur sillage de forts risques de pollution. En débordant, l'eau emporte tout ce qu'elle trouve sur son passage : des débris, des déchets, des ordures, des boues plus ou moins contaminées, des liquides dangereux et des fûts de produits toxiques. Ce qui est ainsi emporté est largement répandu, sur de longues distances. Le mazout d'une seule cuve peut endommager de nombreuses maisons, rendre des logements irrécupérables, et des sols impropres à toute culture. Tout stockage en zone inondable doit donc être évité ou, à défaut, réalisé dans des enceintes parfaitement étanches et inamovibles.

Plus généralement, il importe :

- de prévoir des espaces surélevés pour mettre hors d'eau les produits tels que batteries, insecticides, engrais, herbicides, peintures,
- de nettoyer et de désinfecter tous les objets et meubles qui ont été en contact avec l'eau,
- d'aérer et de désinfecter les pièces, et de les chauffer dès que les conditions de sécurité le permettent.

Les vagues de chaleur ont, de leur côté, souvent pour effet d'augmenter les taux d'ozone et d'autres types de polluants atmosphériques sous l'action du rayonnement solaire ultra-violet. Cette augmentation se produit à partir de composés précurseurs tels que des oxydes d'azote émis par les véhicules, des composés organiques volatils entrant dans la composition des carburants, et de nombreux autres produits comme la colle, la peinture, les encres, les détachants, les cosmétiques ou encore les solvants. Les augmentations des taux d'ozone atmosphérique affectent surtout les villes où elles sont à l'origine d'irritations oculaires, de toux, d'altérations pulmonaires. Les effets sur la santé dépendent de la sensibilité de chacun ; ils varient en fonction de l'âge, de l'état de santé, de la consommation de tabac et de diverses prédispositions (maladies respiratoires ou cardio-vasculaires).

Tous les conseils de base pour lutter contre la chaleur sont à suivre, particulièrement éviter de sortir aux heures les plus chaudes et ne pas hésiter à venir en aide aux personnes en difficulté. Il importe aussi de bien comprendre la signification des niveaux d'alerte pollution, établis à partir de l'évaluation des teneurs de l'air en particules en suspension, en oxydes d'azote, en dioxyde de soufre, en composés organiques volatils ou en ozone. Sur une échelle de 0 à 10, le niveau 8 caractérise une concentration atmosphérique de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ozone pendant une heure : c'est le niveau de l'information du public, des recommandations et, éventuellement, des mesures prises à l'initiative des préfets. Le niveau 10, pour une concentration de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ d'ozone pendant trois heures, est celui de l'alerte et des mesures d'urgence telles que le ralentissement de la vitesse des véhicules sur autoroutes, la circulation alternée en ville, la gratuité des parkings en périphérie des villes, la gratuité des transports en commun.

En fait, les inondations, les vagues de chaleur, les tempêtes ne sont que les révélateurs de pollutions préexistantes dont ils exacerbent les effets. Ces événements doivent inciter à une vigilance constante vis-à-vis des pollutions, quels que soient les milieux affectés, sols, eaux ou air. »

I-6 Quelle est la crédibilité des modèles mathématiques pour prévoir les changements climatiques éventuels et leurs conséquences ?

Roger Temam (Membre de l'Académie des sciences) :

« Les sciences de l'atmosphère et des océans font partie des sciences pour lesquelles l'expérimentation n'est pas toujours possible ; la compréhension des phénomènes dépend donc de leur observation, de leur modélisation mathématique et des simulations numériques que l'on peut en faire. Toutes ces étapes du travail scientifique sont bien sûr choisies suivant l'objectif de connaissances que l'on veut atteindre, et les moyens dont on dispose.

L'observation met en jeu des appareillages et des expériences très importants et très variés : par delà les données météorologiques bien connues, ceux-ci incluent la mise en place de sondes dans les océans et le relevé des mesures qu'elles fournissent, la bathymétrie, perforation et observation du sous-sol dans la mer, la glace et sur terre, les observations et mesures aériennes (tours, ballons et avions) et les observations par satellites. L'interprétation de ces observations dépend de la compréhension des mesures irrégulières et parsemées que l'on peut obtenir, et des statistiques que l'on peut en déduire. Bien sûr l'accumulation et le stockage des quantités colossales de données qui sont ainsi recueillies, sont rendus possibles par les grandes capacités en mémoire des ordinateurs. Leur gestion fait appel aux outils de la théorie des bases de données.

Nous reviendrons plus loin sur la modélisation qui s'étend depuis les phénomènes bien compris comme la mécanique des fluides jusqu'à des phénomènes mal compris en cours d'étude et d'autres qui demanderont sans doute encore dix, vingt ou trente ans pour être finement décrits. Cela inclut des processus physiques, physico-chimiques, chimiques et biologiques tels que :

- les températures, les précipitations, les courants des océans, les vents de l'atmosphère, les échanges avec la stratosphère ;
- les grands cycles biogéochimiques ;
- les aérosols ;
- les grandes structures climatiques comme les moussons, etc.

Un modèle ayant été obtenu, il sera en général impossible d'en résoudre explicitement les équations en raison de leur infinie complexité et on fera donc appel à la simulation numérique. L'idée de décrire par des équations des phénomènes aussi complexes est déjà contenue dans un paragraphe court mais très prémonitoire dans l'Introduction du Traité des Probabilités de Simon de Laplace en 1814. Après le développement de la thermodynamique dans le restant du XIX^e siècle, des scientifiques commencent, au début du XX^e siècle, à formuler un programme très précis de simulation des phénomènes de l'atmosphère. Ce programme commence à prendre corps au milieu du XX^e siècle avec l'apparition des ordinateurs.

De nos jours deux sortes de prévisions climatiques sont faites. Les unes reposent sur les méthodes statistiques et consistent à comparer les observations présentes

aux mesures accumulées ; elles supposent donc l'accumulation de nombreuses données et l'outil statistique ; elles ne peuvent prévoir que des phénomènes qui se sont déjà produits. L'autre approche pour la prévision du climat consiste à modéliser la physique des phénomènes en jeu, à les représenter en simplifiant beaucoup par des modèles mathématiques, des équations d'évolution le plus souvent, et à résoudre les équations mathématiques ainsi obtenues par des méthodes numériques. Au niveau le plus général on trouve les MCG, Modèles de Circulation Générale des océans, de l'atmosphère, ou du couplage Océans-Atmosphère-Glaces. Après discrétisation, on obtient des systèmes de millions d'équations à des millions d'inconnues, dont la résolution se situe à la limite des ordinateurs les plus puissants et pour lesquels des méthodes numériques performantes doivent être développées. Les équations utilisées sont les équations de la mécanique des fluides décrivant le mouvement de l'eau pour l'océan ou de l'air pour l'atmosphère, l'équation du bilan d'énergie donnant la température, les équations de la cinétique chimique décrivant l'évolution des concentrations des différents composés chimiques de l'air, en particulier les pollutions (oxyde de carbone, etc.), et bien d'autres encore. Les équations mettent aussi en jeu, dans les termes sources ou dans les conditions aux limites, des termes mal connus.

La crédibilité des résultats obtenus est encore à améliorer pour caractériser l'évolution climatique de régions de plus en plus petites. On considère que la plus grande source d'incertitude est due aux nuages qui modifient fondamentalement le bilan d'énergie de l'atmosphère par leur capacité à absorber ou non les radiations du soleil (ultra-violet) et de la terre (infrarouge) et par les phénomènes de condensation, gel, dégel ou évaporation qui s'y produisent, Ainsi des hypothèses plus ou moins vérifiées sont faites sur l'ennuagelement de la colonne d'air au-dessus de chaque point du maillage numérique, c'est à dire tous les 10 à 50 kilomètres. On a déjà mentionné les phénomènes mal compris qui nécessitent une modélisation en cours ou à venir, et qui incluent, outre les nuages, la modélisation des glaces, les mers glacées, les échanges radiatifs avec la terre et la glace (albédo), les influences mécaniques, thermiques et chimiques de la végétation, le cycle de l'eau et du carbone dont une partie significative est absorbée par une composante inconnue du système atmosphère-océans, plus généralement les grands cycles biogéochimiques, les aérosols, etc. Pour la prévision de l'avenir, l'autre inconnue significative est l'apport anthropogénique qui dépendra des décisions politiques qui seront prises, de l'évolution des technologies, en particulier dans le domaine des économies d'énergie et dans celui des nouvelles sources d'énergie, et également du comportement de chacun en matière d'isolation, d'économie d'énergie et de consommation. La crédibilité de ces prévisions dépend en outre de l'horizon visé à 10, 20 ou 50 ans, ou pour la fin du siècle. »

Jacques Villain (Membre de l'Académie des sciences) :

1. Chaos météorologique et stabilité climatologique

Aux travaux des climatologues, une objection inévitable est celle soulevée par Claude Allègre dans un de ses livres : « J'ai peine à croire qu'on puisse prédire avec précision le temps qu'il fera dans un siècle alors qu'on ne peut pas prévoir celui qu'il fera dans une semaine ». Le paradoxe n'est qu'apparent puisque la météorologie cherche à prévoir le temps à tel endroit et tel moment, alors que la climatologie

s'intéresse à des valeurs moyennes sur une longue durée et une vaste région. La coexistence du chaos météorologique et de la stabilité climatologique, hypothèse non démontrée, est toutefois fortement suggérée par les calculs basés sur les modèles.

2. L'incertitude est grande et difficile à évaluer

Pourtant, la seule complexité des phénomènes entraîne une grande incertitude sur les résultats. Cette incertitude est exprimée dans les rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) par des appréciations telles que « very likely », « likely », « more likely than not »... Il semble toutefois difficile d'attribuer à ces qualificatifs un sens précis comme ils en ont dans la théorie mathématique des probabilités. La « probabilité » des climatologues semble être un concept un peu subjectif qui inclut les facteurs physiques négligés, le quadrillage trop grossier, l'accord entre les différents modèles, l'accord entre les modèles et les observations... Il est d'ailleurs remarquable que l'incertitude estimée par le GIEC ne s'améliore pas tellement au fil des ans (par exemple entre 2002 et 2007) malgré les progrès indiscutables des modèles. Tout le monde est d'accord pour reconnaître que les incertitudes sont grandes. Les prévisions du GIEC concernant le réchauffement au cours du siècle présent comportent une différence d'un facteur 3 entre la valeur supérieure et la valeur inférieure. Plus incertaines encore sont les évaluations sur les événements extrêmes (tempêtes, sécheresses...). Ceux-ci semblent avoir augmenté au cours des dernières décennies, mais est-ce dû aux activités humaines ? « More likely than not », selon le GIEC !

3. L'incertitude ne justifie pas un acte de foi

Quelles que soient les incertitudes, on ne peut ignorer le fait que, à partir du XX^e siècle, l'ordre de grandeur du réchauffement de la terre résultant des activités humaines n'est pas *a priori* négligeable. Sa valeur précise est en effet la somme de contributions dont certaines (comme l'effet des nuages) sont difficiles à évaluer, mais dont d'autres sont calculables et importantes. Supposer que les diverses contributions vont se compenser, ce serait un acte de foi non justifié.

II- ENVIRONNEMENT ET OCEANS

Les océans, par leur masse, leurs courants et le rôle essentiel du vivant qu'ils abritent, jouent un rôle de premier plan dans les évolutions climatiques. Nous examinons ici ce que les possibilités de mesures nouvelles apportent :

II-1 La hausse du niveau des mers et ses conséquences sur certaines régions côtières basses et peuplées du globe sont souvent citées. Qu'en est-il exactement pour les littoraux de la France ?

Anny Cazenave (Membre de l'Académie des sciences) :

« Au cours du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui d'environ 120 mètres en moyenne. Avec la fonte

des grandes calottes de glace qui recouvraient alors le nord de l'Amérique et de l'Europe, la mer est remontée puis s'est stabilisée il y a environ 3 000 ans. Mais les observations marégraphiques disponibles depuis 150 ans indiquent que la mer a recommencé à monter au cours du XX^e siècle. Ces deux dernières décennies, cette hausse a presque doublé par rapport aux décennies précédentes (c'est ce que montrent les observations des satellites altimétriques franco-américains Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, développés par le Centre National d'Etudes Spatiales et la NASA depuis 1992). Elle atteint aujourd'hui 3,5 millimètres par an en moyenne. Tout suggère que la hausse actuelle du niveau de la mer est liée au réchauffement climatique affectant la planète depuis quelques décennies. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle l'océan s'est beaucoup réchauffé. Il stocke actuellement près de 80 % de l'excès de chaleur accumulée dans le système climatique au cours des 50 dernières années. La dilatation thermique des océans causée par l'augmentation de la température de la mer explique une partie de la hausse observée de leur niveau. Depuis quelques années, on assiste à un déclin important des glaces continentales. Les glaciers de montagnes fondent et les glaciers périphériques du Groenland et de l'Antarctique de l'ouest s'écoulent dans l'océan à une vitesse accélérée. C'est l'autre grande cause de l'élévation actuelle du niveau de la mer. Pour les deux dernières décennies, ces facteurs (dilatation thermique de l'océan, fonte des glaciers de montagne, perte de masse des calottes polaires) contribuent chacun pour environ un tiers à la hausse observée du niveau de la mer.

Grâce à leur couverture complète du domaine océanique, les satellites altimétriques nous ont révélé que la hausse du niveau de la mer est loin d'être uniforme. Dans le Pacifique ouest par exemple, la mer s'est élevée 2 à 3 fois plus vite qu'en moyenne depuis 20 ans. Nous savons aujourd'hui que cette importante variabilité régionale est causée par le réchauffement non uniforme de l'océan. Résultat : la mer monte plus vite dans certaines régions que dans d'autres.

La hausse du niveau de la mer constitue une menace pour de nombreuses régions côtières basses, souvent très peuplées, de la planète. On s'attend à une hausse accrue du niveau de la mer au cours du XXI^e siècle ; à cause de la dilatation thermique de l'océan qui se poursuivra, et surtout à cause de la fonte des glaces continentales. Si la calotte polaire du Groenland venait à disparaître, le niveau de la mer s'élèverait de 7 m ! Un tel événement, s'il se produisait, prendrait cependant plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires. On ne connaît pas encore avec précision ce que sera la contribution des calottes polaires au niveau de la mer des prochaines décennies. Mais certaines estimations récentes suggèrent qu'une hausse moyenne de la mer de l'ordre de 1 m n'est pas à exclure à l'horizon 2100; avec cependant de fortes variations d'une région à une autre. Dans nombre de régions côtières basses de la planète, la hausse du niveau de la mer se combine avec d'autres facteurs non climatiques, ce qui les rend encore plus vulnérables. C'est le cas par exemple de l'enfoncement du sol lié à des phénomènes naturels (par exemple, la surcharge des sédiments accumulés dans les deltas des grands fleuves) ou aux activités humaines (le pompage des eaux souterraines ou du pétrole). D'autres facteurs, tels la diminution des apports sédimentaires à la mer par les fleuves, causée par la construction de barrages, l'urbanisation intensive du littoral, la modification des courants côtiers, etc., contribuent aussi à modifier la morphologie de la côte. Pour de nombreuses régions du monde (y compris la France et ses départements et territoires d'outre-mer), la contribution respective de ces différents facteurs à l'érosion du littoral est encore incertaine. Des « modèles » d'évolution et

de vulnérabilité des zones côtières en réponse aux forçages anthropique et climatique sont des outils d'aide à la décision devenus indispensables pour les responsables politiques en charge de l'aménagement du territoire. »

II-2 L'acidification des océans est-elle réelle ? Menacerait-elle la vie marine ?

Anny Cazenave (Membre de l'Académie des sciences) :

« La teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère augmente de façon exponentielle depuis le début de l'ère industrielle. Alors que depuis 650 000 ans environ, celle-ci n'a jamais dépassé 280 ppm (parties par million), elle atteint actuellement plus de 380 ppm (383 ppm en 2007) ; soit une augmentation de plus 30% en deux siècles (et particulièrement rapide depuis 30 ans). Il est largement admis aujourd'hui que cet accroissement récent du CO₂ dans l'atmosphère résulte des activités humaines : combustion des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) et déforestation dans les régions tropicales. Les émissions atteignent actuellement 8.5 milliards de tonnes de carbone par an (6.2 en 1990). Une partie seulement (environ 3.7 milliards de tonnes par an en 2007) s'accumule dans l'atmosphère. Le reste (4.8 milliards de tonnes par an) est absorbé par la végétation pour sa croissance et par l'océan (respectivement 2.6 et 2.3 milliards de tonnes par an en moyenne sur 2003-2007). L'océan est donc un puits de carbone et sans lui, la teneur atmosphérique en gaz carbonique serait bien supérieure.

L'absorption du gaz carbonique par l'océan résulte de deux phénomènes : la photosynthèse par le phytoplancton et la dissolution partielle du gaz dans les eaux superficielles de l'océan. Ce second mécanisme est de loin dominant dans l'absorption du carbone atmosphérique. En se dissolvant dans la mer, le gaz carbonique se combine avec l'eau pour former des ions hydrogénocarbonate et libérer des ions hydrogène, ce qui a pour effet de diminuer le pH de l'eau ou accroître son acidité (l'acidité est généralement exprimée au moyen d'un paramètre, le pH, fonction logarithmique de la concentration des ions hydrogène). Depuis environ un siècle, le pH de l'océan superficiel a diminué de ≈ 0.1 en unité pH (ce qui correspond à une augmentation de 20 à 26 % de la teneur en ions hydrogène). On s'attend à une diminution accrue du pH dans les prochaines décennies, de l'ordre de 0.3 à 0.4.

Cette augmentation de l'acidité des océans a des effets pervers sur la vie marine. Différents organismes marins ont un squelette ou une coquille formés de carbonate de calcium (par exemple, les coraux). L'eau de mer plus acide a un effet corrosif en freinant la croissance de ces organismes. Malgré les efforts de certains pays pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il n'est pas exclu de voir, d'ici la fin du XXI^e siècle, la teneur atmosphérique en CO₂ doubler par rapport à l'état préindustriel (soit 560 ppm). Outre l'impact sur les récifs coralliens, l'augmentation de la teneur en gaz carbonique dans l'océan et de l'acidité des eaux peuvent avoir d'autres effets néfastes ; en créant des troubles du métabolisme de certaines espèces marines, avec des conséquences incertaines sur la pêche ou en réduisant la capacité de l'océan à absorber le carbone anthropique. »

Bernard Kloareg (Correspondant de l'Académie des sciences) avec Colombar de Vargas, chercheur au CNRS, Station biologique de Roscoff :

« On appelle « acidification des océans » le phénomène physico-chimique relativement simple qui lie l'augmentation de la pression partielle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ($[pCO_2]$) à l'augmentation de la concentration des ions hydrogénocarbonate ($[HCO_3^-]$) et de protons ($[H^+]$) dans les eaux océaniques.

Depuis la révolution industrielle, il y a environ 200 ans, l'humanité a brûlé une partie importante de la matière organique piégée dans la lithosphère et transformée en hydrocarbures ou charbon au cours des temps géologiques. Cette combustion des énergies fossiles a brusquement augmenté la concentration du CO_2 atmosphérique : les mesures issues des carottes glacières indiquent que nous serions passés de 280 à 380 ppmv (partie par million en volume), soit une augmentation de 30% du taux de CO_2 atmosphérique depuis le début du XIX^e siècle. Or environ un tiers du CO_2 rejeté dans l'air par les activités humaines a été absorbé par les océans, où il est soit photosynthétisé par les macro-algues littorales et les micro-algues (le phytoplancton), puis recyclé en O_2 et en matière organique, soit associé à l'eau pour produire des ions HCO_3^- et H^+ . La diminution du pH s'accompagne également d'une paupérisation en ions carbonate (CO_3^{2-}).

L'augmentation des teneurs en gaz carbonique dans l'atmosphère se traduit donc par une acidification marquée (diminution du pH) de l'eau de mer. Si l'acidification et les changements corrélatifs de la composition ionique de l'eau de mer sont relativement bien connus et prédictibles, les effets de l'ensemble de ces modifications sur la physiologie et l'adaptation des organismes marins le sont beaucoup moins. Il est certain néanmoins que les modifications de la chimie des océans corrélées à l'acidification de l'eau auront des conséquences très grandes sur le métabolisme des organismes marins. Deux processus cellulaires fondamentaux, en particulier, seront affectés, les mécanismes de concentration du carbone inorganique, à la base de la photosynthèse, et les processus de calcification, qui sont essentiels pour le développement des organismes à squelette calcaire, interne ou externe. En effet, les substrats de départ de ces métabolismes sont respectivement le CO_2 et les ions CO_3^{2-} .

Or, la photosynthèse et la calcification sont deux processus fondamentaux pour les grands équilibres biogéochimiques de notre planète, parce que ces derniers mettent en jeu l'action des organismes vivants. Le plancton océanique photosynthétique, en particulier, produit environ la moitié de la matière végétale (et donc de l'oxygène) sur Terre. Il joue un rôle prépondérant dans le cycle du carbone, notamment par la production d'exosquelettes calcaires, qui exportent du carbone vers le fond des océans quand ces micro-algues meurent (un phénomène à l'origine des formations sédimentaires calcaires). Une question importante sur le plan de la régulation du climat est donc l'adaptation des micro-algues aux conséquences des changements climatiques en cours, que ce soit l'augmentation de la température de l'eau de mer ou son acidification.

Comment la photosynthèse et les processus de calcification du phytoplancton marin vont-ils réagir aux changements de concentrations en ions HCO_3^- et CO_3^{2-} , respectivement ? Malheureusement, il est très difficile de mesurer aujourd'hui, et donc de prédire, les réponses physiologiques et génétiques de ces algues unicellulaires. Ni les expériences en laboratoire sur des souches isolées, ni même les expériences de terrain de type « mésocosme », ne reproduisent de façon réaliste

la complexité spatio-temporelle des populations de plancton, qui contiennent une énorme diversité génétique à l'échelle globale. Il est possible que certaines espèces puissent s'adapter parce que capables d'évoluer rapidement en raison des effectifs très élevés de leurs populations et de la rapidité de leur reproduction, mais ces questions restent très peu étudiées.

De même, diverses expériences, par exemple sur l'oursin ou l'ophiure, ont déjà montré qu'une diminution du pH de l'eau de mer de quelques dixièmes d'unité affecte grandement le développement des larves de ces organismes. Là encore l'adaptation des organismes marins au changement climatique va dépendre à la fois de la vitesse de ces changements, de la biologie et des ressources génétiques chez ces organismes. Mais il est à craindre que cela se traduise par une diminution très forte de la biodiversité marine, certains prédisant même des extinctions massives en raison de l'ampleur et de la vitesse des changements désormais inéluctables au niveau des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer.

Sans aller jusqu'à ce scénario aussi catastrophique, il est certain que les écosystèmes marins vont subir des changements importants, avec une érosion rapide de la biodiversité ou, pour le moins, un déplacement des aires de répartition biogéographique des espèces. Les chaînes trophiques en seront affectées avec toutes les conséquences que l'on peut en attendre au niveau des services que fournissent ces écosystèmes pour les activités humaines : pêche, aquaculture, tourisme... Un écosystème emblématique de ces enjeux, les récifs coralliens, subit déjà de plein fouet les effets combinés du réchauffement et de l'acidification de l'eau de mer, avec des phénomènes massifs de blanchiment et de mortalité.

Au total, parvenir à diminuer très significativement les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère est un enjeu essentiel dans l'évolution des écosystèmes marins et pour l'Homme. »

III- ENVIRONNEMENT ET ENERGIES

L'énergie est présente dans tous les aspects de la vie des hommes. Les contraintes qui pèsent sur leur abondance et sur les produits de la combustion du charbon et des carburants conduisent à rechercher d'autres sources d'énergie. En voici la revue :

III-1 En France, les émissions de gaz à effet de serre ont considérablement diminué avec notre parc de centrales électronucléaires. Comment peut-on améliorer encore les performances ainsi que la sécurité de ce parc et de son cycle de combustibles ?

Robert Guillaumont (Membre de l'Académie des sciences) :

« En effet, l'électronucléaire émet très peu de CO₂. Les combustibles fossiles (charbon, produits pétroliers, gaz naturel) sont des composés de carbone. L'énergie fournie sous forme de chaleur par leur combustion provient de l'oxydation du carbone en CO₂ par l'oxygène de l'air. C'est une réaction chimique. La combustion d'une tonne de produits pétroliers ou de 1000 m³ de gaz naturel produit une énergie de 11,6 MégaWatt.heure, MWh (1 tonne équivalent pétrole = 1 tep) et la combustion d'une tonne de charbon produit entre 0,6 et 0,4 tep. Les rendements de conversion de l'énergie produite par la combustion en énergie électrique sont de 0,4 pour les centrales à charbon ou à fioul et de 0,5 pour les centrales à gaz.

Les combustibles nucléaires sont des composés de métaux lourds (thorium, uranium, plutonium). L'énergie fournie sous forme de chaleur par leur « combustion » provient essentiellement de la fission des noyaux de ces éléments placés dans un flux de neutrons. Il s'agit d'une réaction nucléaire. On utilise le terme de combustion par analogie avec la combustion des combustibles fossiles (où les neutrons seraient l'équivalent de l'oxygène) mais il s'agit ici de la libération de l'énergie des noyaux des atomes et non de l'énergie résultant de la combinaison d'atomes comme dans une combustion classique. La combustion nucléaire produit des déchets radioactifs de natures très diverses (le mot de « déchet radioactif » n'a pas le même sens dans les divers pays de l'Union Européenne ni de ceux de l'OCDE) qui sont, pour la plupart, entreposés d'une manière provisoire. Des recherches sur la gestion de certains de ces déchets sont en cours en France, définies par une première loi en 1991 (prévue pour une durée de 15 ans) puis par une seconde loi en 2006 (prévue elle aussi pour une deuxième durée de 15 ans). Aujourd'hui les réacteurs nucléaires à neutrons thermiques des parcs électronucléaires permettent d'extraire en moyenne une énergie de 15 000 tep d'une tonne d'uranium naturel. Leur rendement de conversion de l'énergie produite par le réacteur nucléaire en énergie électrique est de 0,33. Les réacteurs à neutrons rapides de la prochaine génération de réacteurs, si elle est déployée, permettront d'extraire 20 à 30 fois plus d'énergie d'une tonne d'uranium en un seul passage en réacteur (la limite théorique est de 140 en plusieurs passages) et d'améliorer le rendement de conversion en énergie électrique.

Le combustible nucléaire en brûlant n'émet pas de CO₂. Pour autant on crédite l'énergie électrique d'origine nucléaire de la production de 4 à 6 kg de CO₂ par MWh produit (MégaWatt.heure.électrique), à comparer avec 0,8 à 1,2 tonne de CO₂ par MWh pour l'électricité produite à partir du charbon, 0,4 à 0,6 tonne par MWh si on utilise du gaz et 0,9 tonne par MWh si on utilise du fioul. Ces valeurs résultent d'analyses dites de « cycle de vie » prenant en compte toute l'énergie émettant du CO₂ qu'il faut dépenser pour assurer la construction, le fonctionnement et la déconstruction des installations produisant l'électricité. Pour l'électricité nucléaire, il s'agit de l'énergie dépensée aux étapes du cycle du combustible (extraction de l'uranium, enrichissement de l'uranium, fabrication du combustible, fonctionnement du réacteur, gestion des déchets, ..). Ces valeurs dépendent de l'origine de l'énergie

utilisée, nucléaire ou non, et du temps pendant lequel les installations existent. Elles varient selon les pays.

Quels efforts doit-on consentir dans l'avenir?

Un réacteur nucléaire d'une puissance de 1 GWe (GigaWatt électrique) de la génération actuelle (deuxième génération) produit environ une énergie de 7,5 TeraWatt.heure, TWhe, par an. Le parc français a une puissance de 60 GWe et assure 85 % des 550 TWhe d'énergie électrique consommée. Le complément est essentiellement apporté par l'hydraulique (puissance de 25 GWe installée), puis les centrales thermiques à flamme (charbon, gaz, fioul, puissance totale installée 27 GWe), et encore très peu, par l'éolien (puissance installée de 2,24 GWe). Le CO₂ évité par l'utilisation de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité est considérable par rapport à une situation virtuelle de référence où l'essentiel de l'électricité serait produit avec du gaz. Les crédits CO₂ pour l'hydraulique et l'éolien sont très faibles (respectivement de 3 à 4 kg/MWhe d'énergie produite et de 10 à 15 kg/MWhe d'énergie produite).

Il n'est pas prévu d'augmenter la part du nucléaire dans les années qui viennent dans la production massive de l'électricité. L'augmentation de la demande en électricité devrait être couverte par les énergies à bas carbone notamment par une croissance de l'éolien (puissance de 25 GWe prévue en 2020, soit environ 6 000 éoliennes en plus des 2 000 déjà installées), seule source capable d'apporter un complément supplémentaire substantiel au nucléaire car les ressources hydrauliques ne peuvent augmenter. L'éolien est mature et ne demande pas d'effort particulier de recherche et développement hormis l'insertion sur le réseau électrique de l'électricité instantanée fournie et le stockage de l'énergie électrique ne pouvant pas y être injectée. En revanche le parc nucléaire doit être progressivement renouvelé avec des réacteurs EPR, « European Pressurized Reactor » (version améliorée des réacteurs actuels, dits de troisième génération). L'épuisement des ressources en uranium pourrait conduire à partir de 2050 à l'exploitation de réacteurs à neutrons rapides (nucléaire de quatrième génération). Il s'agira alors d'un changement considérable dans le nucléaire de fission appelant un nouveau cycle du combustible fermé (retraitement des combustibles usés et de transmutation). Les efforts de R et D sont d'ores et déjà engagés dans cette voie. C'est à ce prix et en complétant ses besoins par 20 à 25 % d'énergie renouvelable que la France continuera à conserver son indépendance énergétique (objectif initial du programme nucléaire) et à n'émettre que peu de CO₂ pour produire son électricité. »

Bernard Tissot (Membre de l'Académie des sciences) :

« Il faut, dans les engagements qui pourront être pris par les divers pays, tenir compte des évolutions déjà faites. Trois étapes peuvent contribuer de façon importante à la diminution des émissions de gaz à effet de serre: (i) le remplacement des centrales électriques thermiques (charbon, produits pétroliers) par des centrales utilisant les énergies nucléaire ou renouvelables ; (ii) les économies d'énergie dans l'habitat et les automobiles ; (iii) un transfert modal dans le transport des marchandises.

Dans le cas particulier de la France, la première étape (i) a déjà été franchie : le bénéfice sur les émissions est déjà « comptabilisé » et nous pouvons seulement,

pour l'avenir, maintenir élevée à environ 95 % de la production électrique la part du domaine nucléaire/hydraulique qui ne génère pas de gaz à effet de serre (et non pas bloquer cette production à sa valeur actuelle). Un engagement international à diviser nos émissions de gaz à effet de serre par quatre en 2050 serait donc beaucoup plus difficile à tenir que pour les pays qui ont encore beaucoup de centrales classiques à charbon. La promesse de la France devra alors jouer essentiellement sur l'efficacité énergétique (ii) dans l'habitat et le transfert de modes et de vecteurs de consommation de l'énergie, tels que l'utilisation de la voiture électrique, et (iii) dans le transport des charges lourdes par conteneurs acheminés prioritairement par voie ferrée électrifiée, puis livrés par route. Ces diverses évolutions posent des problèmes difficiles.

Dans le domaine résidentiel et tertiaire, le chauffage solaire de l'eau sanitaire dans des panneaux posés sur des toitures ou des façades est déjà largement appliqué dans certains pays européens ou méditerranéens. Les pompes à chaleur permettent de réduire les dépenses de chauffage. Cependant les uns et les autres rencontrent en France des difficultés sociologiques (style de vie, longévité des habitations, service après vente) ou économiques (prix excessif des matériels appropriés tels que double-fenêtres et leurs huisseries, lampes à faible consommation).

C'est dans les transports, en particulier terrestres, que les économies seront les plus difficiles. Ce domaine est déjà le plus fort émetteur annuel de CO₂ au niveau mondial et présente la plus forte croissance annuelle. La solution la plus efficace à long terme, notamment dans les agglomérations de plusieurs millions d'habitants, est le transport électrique en site propre (train, métro, tramway ou combinaison de ces divers modes). Sur les longues distances, le trajet Paris-Marseille génère pour un passager 5 kg de CO₂ en TGV, 20 fois plus en avion et 30 à 50 fois plus en voiture. Le mode de transport par rail est privilégié au Japon.

Le fret routier lourd s'est largement développé en Europe, réduisant la part des transports ferroviaires et de la voie d'eau. L'élargissement de l'Union européenne a renforcé cette tendance. Ce mode de transport est gros consommateur d'énergie, et le captage du CO₂ n'est pas possible. Le seul choix reste entre l'émission toujours croissante de gaz à effet de serre (surtout si, comme certains le demandent, le poids maximum autorisé passe de 40 tonnes à 44 ou 48 tonnes) et le transfert modal. Les charges lourdes (matériaux de construction, véhicules neufs, conteneurs et équipements divers, etc.) sont transportables par des voies ferrées électrifiées ou par voie d'eau, puis livrables au client par route sur quelques dizaines de kilomètres. La France a vécu un siècle sur ce mode. La Suisse a ainsi trouvé un équilibre qui lui permet actuellement d'économiser à la fois sur la consommation de carburant et sur l'entretien coûteux d'un réseau routier de montagne. »

III-2 Faut-il utiliser des biocarburants, les mélanger avec les carburants fossiles? Quels en sont les avantages et les inconvénients?

Sébastien Candel (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« La politique de développement des biocarburants menée en Europe depuis le début des années 1990 s'est bâtie autour de trois objectifs : soutenir la filière agricole, lutter contre les gaz à effet de serre, favoriser le démarrage d'une filière assurant une plus grande indépendance énergétique. Cette politique a conduit à la

mise en oeuvre de biocarburants de première génération dont les principaux sont actuellement :

(1) L'éthanol produit par fermentation de sucres (canne à sucre, betterave) ou d'amidon (blé, maïs) est maintenant largement utilisé pour les moteurs à essence. Il est généralement mélangé à l'essence à hauteur de 10 à 25 % mais peut aussi être utilisé à l'état pur dans certains moteurs. En Europe, on utilise plutôt un dérivé de l'éthanol obtenu par combinaison avec de l'isobutène l'ETBE (Ethyltertiobutyléther), qui peut être mélangé jusqu'à hauteur de 15 % dans l'essence et ne pose pas de problème de démixtion en présence d'eau.

(2) Le biodiesel (EMHV) est un ester méthylique d'huile végétale issu de la transformation d'huile de colza et de méthanol et commercialisé sous le nom Diester™. L'EMHV possède des propriétés physiques proches de celles du gazole. Il est actuellement disponible à la pompe en mélange avec le gazole dans des proportions variant de 2 à 5 %.

Dans les deux cas, le mélange avec des carburants fossiles permet de réduire la consommation de ces derniers. L'addition d'une faible quantité de biocarburant ne nécessite aucune adaptation ou des adaptations mineures des moteurs et s'applique facilement au parc automobile actuel. L'utilisation de biocarburant en proportion plus élevée (par exemple 85 % d'éthanol) demande des modifications plus importantes et des moteurs adaptés ou qui peuvent s'adapter aux nouveaux mélanges (moteurs flex-fuel utilisés au Brésil).

Les biocarburants accroissent l'indépendance énergétique vis-à-vis du pétrole mais dans une mesure encore faible (la consommation européenne d'EMHV est actuellement de l'ordre de 4 Mtep (millions de tonnes d'équivalent pétrole) et celle de bioéthanol de l'ordre de 0.9 Mtep).

Ils permettent de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre puisque le CO₂ libéré lors de la combustion de biocarburants rentre dans le cycle du carbone assurant la croissance des plantes. Une analyse de cycle de vie montre cependant que le gain, tout en restant positif, est moins important. Il faut en effet utiliser des machines agricoles, des engrais et des pesticides, collecter, transformer les plantes pour les convertir en biocarburant, ce qui nécessite de l'énergie mais les chiffres divergent en fonction des hypothèses retenues et pour les diverses filières. Pour l'EMHV extrait du colza, le gain de consommation énergétique serait d'environ 65% et le gain en émission de gaz à effet de serre atteindrait 70 %. Un intérêt mis en avant pour les biocarburants est l'utilisation à des fins non-alimentaires des terres mises en jachère dans le cadre de la politique agricole commune (PAC).

On estime qu'une consommation de 5% de biocarburants (soit 2 Mtep) nécessiterait quasiment toute la surface de jachère disponible en France (soit environ 1 500 000 hectares).

Un des dangers de la généralisation des biocarburants, souvent évoqué au niveau mondial, est celui de la concurrence entre l'utilisation des terres agricoles pour les cultures vivrières et de celles qui seraient consacrées à la culture de plantes matière première des biocarburants.

Pour que la production de biocarburants dans les années à venir ne soit pas limitée par les surfaces disponibles, il faudra augmenter les rendements à l'hectare en utilisant des plantes à croissance rapide et chercher à utiliser une plus large gamme de matières premières et notamment des déchets et des sous produits de l'activité agricole ou forestière. De nouvelles technologies qui sont actuellement en développement devraient permettre l'apparition de filières de production de biocarburants de deuxième génération utilisant par exemple, des résidus agricoles

comme la paille ou la sciure de bois pour produire par gazéification des hydrocarbures par synthèse de type Fischer-Tropsch qui pourront ensuite être mélangés au gazole. Il y a clairement des besoins de recherche importants pour mettre au point ces filières de production de deuxième génération.

Au delà de cette deuxième génération, les recherches portent notamment sur les possibilités de production de biocarburants à partir d'algues. Les algues sont intéressantes car elles n'utilisent pas de surfaces dédiées à la production de nourriture, elles absorbent le gaz carbonique et la lumière du soleil pour produire en milieu aqueux des huiles dont la structure est proche de celle des produits pétroliers. Les biocarburants tirés des algues pourraient constituer à terme une source importante de produits de substitution au pétrole. Une estimation d'Exxon Mobil, qui a investi récemment des sommes importantes dans ce domaine, donne un rendement de 20 000 litres par hectare et par an, mais la production à grande échelle de biocarburant à partir d'algues pose des défis majeurs qui nécessitent un effort important de recherche et développement avec notamment une optimisation de la production des algues et des procédés d'extraction d'huile. »

Bernard Tissot (Membre de l'Académie des sciences) :

« La biomasse intervient ordinairement dans le bilan énergétique par son utilisation traditionnelle comme combustible de chauffe. Il s'agit certainement là de l'utilisation la plus directe et efficace : les pays industrialisés pourraient reconsidérer cet usage. Dans les villes moyennes, des réseaux de chauffage urbain en permettraient l'utilisation.

L'usage des biocarburants (alcools, esters) issus de cultures dédiées (maïs, colza) peut faciliter en Europe une période de transition. Dans chaque cas, il serait très important de disposer de données précises et fiables sur l'énergie fossile consommée dans l'ensemble du cycle de vie du produit, pour faire un bilan énergétique « du sol à la roue ». Certainement rentables au Brésil (alcool produit à partir de la canne à sucre), ils ne paraissent pas constituer en France une importante voie d'avenir (bilan énergétique, subventions, dispositions fiscales). Déjà, la totalité des terres arables de la France ne suffirait pas à faire rouler le parc de véhicules actuel ; il en serait de même au niveau mondial en 2030. Il existe, à terme, un risque certain de compétition entre la production de carburants pour les véhicules et celle de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle. Une autre forme de compétition s'installerait entre l'usage de l'eau douce (qui n'est pas inépuisable) pour les cultures alimentaires et son usage pour celles visant la production de biocarburants.

En revanche, l'utilisation de l'ensemble de la biomasse ligno-cellulosique, comme des futaies à courte rotation, pourrait privilégier des terres peu favorables à la production alimentaire et viser la totalité de la plante (c'est cette voie qu'on désigne sous le nom de 2^{ème}, voire de 4^{ème} génération, sans toujours préciser ce que sont les précédentes). Cette voie plus complexe permettrait de produire par gazéification suivie d'une synthèse chimique, des carburants de qualité, en particulier pour les moteurs diesel.

Gardons cependant toujours à l'esprit que le plus grand apport de la biomasse dans la lutte contre le changement climatique existe et nous le détruisons : il s'agit de la forêt primaire qui joue un rôle capital dans les échanges de CO₂ entre l'atmosphère, la végétation et les sols. »

III-3 Quel sera pour la France l'apport des éoliennes ?

Bernard Tissot (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'énergie renouvelable d'origine éolienne est souvent citée et présentée comme une source envisageable pour répondre à une demande concentrée et constamment croissante d'électricité, sans générer de CO₂. Certains pays, qui ont décidé de fermer leurs centrales nucléaires, veulent les remplacer par des éoliennes. Le problème principal de cette énergie est son caractère intermittent (vent trop faible ou trop fort) : cette limitation s'exprime par un « *average capacity factor* » de 15 à 20 % au lieu de 80 à 90 % dans les centrales thermiques ou nucléaires. C'est la classique distinction entre puissance nominale et énergie produite, si souvent oubliée dans les annonces faites au public. Pour une puissance installée de 1 000 MW, la quantité d'énergie produite en un an est de 8 000 GWh (gigawatts.heure) dans le cas du gaz ou du nucléaire et de 2 000 GWh dans l'autre cas. Il ne faut pas que l'enthousiasme pour cette forme d'énergie renouvelable masque la réalité : elle sera le plus souvent une énergie d'appoint dans les pays à forte concentration de population et demande électrique importante.

L'énergie éolienne peut constituer un élément significatif dans la production d'électricité en Allemagne, au Danemark et dans d'autres pays de l'Union Européenne, pour limiter la part, actuellement élevée, du charbon, fort producteur de gaz à effet de serre. Au-delà de 15 ou 20 % de la production, on doit s'interroger sur la nécessité d'adosser celle-ci à un réseau interconnecté important et robuste, et d'assurer le relais en cas de vent trop faible ou trop fort (par exemple, les éoliennes du Danemark relayées par l'hydroélectricité de Norvège).

Une telle démarche en France aboutirait à substituer cette source intermittente à du nucléaire en base ou à de l'hydroélectricité (décision anti-écologique, s'il faut avoir des centrales à charbon de type classique en secours).

On notera enfin les réserves formulées par des Membres de l'Académie Française et de l'Académie des Beaux Arts ainsi que par diverses associations, sur les sites à protéger et les monuments historiques, ainsi que celles portant sur les conditions de rachat de l'électricité produite et l'économie globale du projet, formulées par des Membres de l'Académie Française et de l'Académie des Sciences Morales et Politiques.

Une production photovoltaïque d'électricité qui soit significative au niveau de la demande européenne paraît encore lointaine. Par contre, fournir par une aide directe aux villages des pays du Tiers monde, non reliés à un réseau, un minimum d'électricité pour une antenne médicale ou pour rompre l'isolement relève de l'éthique, et permettrait aux industriels européens d'acquérir une expérience précieuse. »

III-3 Quel sera pour la France l'apport des éoliennes ?

Michel Combarous (Correspondant de l'Académie des sciences)

Le contexte général énergétique et son évolution à terme

Si la consommation d'énergie, de tous types, est, par habitant de la planète, sensiblement la même depuis le début des années 70, égale à un peu plus de 1,5 tonne d'équivalent pétrole par habitant et par an, la consommation globale croît régulièrement, à la mesure de l'accroissement de la population mondiale qui avoisine encore les 200 000 habitants par jour !

Dans ce contexte général, on met en place, chaque **jour**, dans le monde, l'équivalent de 500 MW (correspondant à un « fonctionnement en continu » sans aucun arrêt dans l'année).

La nécessaire expansion des énergies renouvelables

C'est cette évolution forte qui est, bien sûr, la cause de l'accroissement des contraintes sur toutes les formes d'énergie. Les perspectives que trace l'épuisement à terme du pétrole et du gaz, avec l'augmentation inéluctable du prix de ces sources d'énergie, contribuent fortement au développement des énergies renouvelables sous toutes les formes (comme d'ailleurs à des efforts nombreux en matière d'économie d'énergie). C'est bien parce que l'ensemble continue de s'accroître fortement que le poids moyen des énergies renouvelables dans le « bouquet énergétique » mondial reste cependant, pour l'instant, relativement stable, à environ 20 % de l'ensemble.

L'énergie éolienne et ses perspectives

Dans ce contexte général, les débats sur les coûts des différentes formes d'énergie, pour importants qu'ils soient, ont souvent un caractère relatif qui devrait inciter à la prudence, tant au niveau mondial qu'aux niveaux régionaux ou nationaux.

Si de nombreuses solutions sont possibles pour capter une partie de l'énergie cinétique des masses d'air en déplacement, des premiers moulins à vent aux éoliennes campagnardes utilisées depuis longtemps dans maints pays, si de nombreuses solutions sont en cours d'investigation (éoliennes à axe de rotation vertical, « tours à vent »,...), ne sont évoquées ici que les éoliennes classiques à trois pales.

Les éoliennes de ce type (il existe de par le monde près d'une trentaine de fabricants de telles machines) ont trois pales de 30 à 60 m environ. La nacelle est mise en place au sommet d'un mât de 80 à 120 m. L'ensemble pèse plusieurs dizaines de tonnes et la production, à sa puissance maximale, varie, selon les modèles, entre 1,5 et 6 MW.

Ces dispositifs se sont très fortement développés ces toutes dernières années. Les statistiques mondiales les plus récentes indiquent qu'à la fin de l'année 2008 la puissance installée totale était de 120 000 MW. La puissance totale des machines, mises en place, pour l'instant, principalement en Europe et aux Etats-Unis, avec un développement plus récent mais significatif en Asie et dans le Pacifique, a connu, de 2005 à 2008, **un** doublement en trois années seulement !

On peut comparer la puissance éolienne actuellement installée à la puissance des réacteurs nucléaires implantés dans le monde : la puissance électrique installée est d'environ 350 000 MW, soit moins de trois fois plus que la puissance électrique des machines éoliennes. Il est bien sûr à noter, cependant, que les « temps de

production » dans l'année sont sensiblement différents entre l'éolien (environ 2 000 heures par an, sur les 8 800 de l'année) et le nucléaire (plus de 7 000, en moyenne environ).

En France, un pays « parti » un peu tard dans le domaine de la production d'électricité par voie éolienne, près de 2 500 éoliennes sont d'ores et déjà installées (un plan national en prévoit près de 4 000). La part de l'éolien dans la consommation électrique domestique de certaines régions (Picardie, Lorraine, Centre, Champagne-Ardenne et Languedoc-Roussillon) est déjà supérieure à 10%. Dans certaines régions, Aquitaine et Bourgogne, comme en Alsace et Ile-de-France, la production éolienne n'est, par contre, pas significative. La **production effective**, en 2008, a été de 5,5 TéraWh, ou MMWh (tétra = 10^{12} , ou million de million), soit l'équivalent d'une tranche de centrale qui produirait, sans aucune interruption dans l'année, avec une puissance d'un peu plus de 600 MW.

Ce développement spectaculaire des « fermes éoliennes », nombreuses à travers le monde, ne doit pas faire oublier que bien des éléments de progrès sont encore à naître en matière d'éoliennes de relativement grandes puissances, les plus « classiques » actuellement. Probablement pas sur leur taille, mais bien plutôt sur certains aspects de leur design, sur l'interactivité individuelle de chacune des trois pales, dont l'inclinaison peut être commandée individuellement. Beaucoup de progrès techniques, souvent inspirés des évolutions rencontrées dans l'industrie aéronautique, comme également dans la gestion des intermittences de production électrique dans les réseaux, sont encore à naître qui conduiront à augmenter la durée effective de fonctionnement des machines dans l'année et donc leur rentabilité.

Des développements proches, à terme

Si les développements importants, en mer, de projets très nombreux de « fermes éoliennes » constituent un élément tout à fait significatif pour le futur, on peut classer dans la thématique « mouvements de l'air et de l'eau au service de l'énergie » d'autres perspectives qui semblent très prometteuses.

Tel est, tout naturellement, le cas de toutes les formes de « petites éoliennes », à usages locaux très décentralisés, des « tours à vent », des machines à axes verticaux, voire même des travaux sur les aménagements de certains immeubles, voire quartiers pour exploiter des « courants d'air » localisés et contrôlés,...

Tel est aussi le cas, puisque moulins à eau et moulins à vent ont toujours été naturellement liés, des perspectives importantes offertes par les **hydroliennes**, à placer en mer dans des zones à forts courants. A puissances égales, elles seront, bien sûr, de taille plus réduite, les masses volumiques de l'eau liquide et de l'air, sous la pression atmosphérique, étant dans un rapport de près de 750, rapport que l'on retrouve donc dans le rapport des énergies cinétiques de deux volumes égaux et de mêmes vitesses des deux fluides. Techniques et démarches technologiques ont beaucoup de points communs, et l'avenir pourrait être porteur avec tous les progrès des matériaux et systèmes mis à la mer.

Références :

- De très nombreux sites sont consacrés à l'énergie éolienne, souvent de qualité. On peut penser par exemple à : <http://www.thewindpower.net>
- « *L'éolien une énergie du 21^{ème} siècle* ». 10 questions proposées par Gilbert Ruelle, Académie des Technologies, 40 pages, mars 2009.

III-4 a) En Europe : peut-on donner un calendrier de l'utilisation du gaz naturel et du pétrole dans les prochaines décennies ?

b) Certaines des nations ayant de fortes réserves de charbon s'impliquent dans la capture des fumées et le stockage du gaz carbonique. Comment ? Quel rôle l'Europe va-t-elle jouer ?

Bernard Tissot (Membre de l'Académie des sciences) :

« Les produits pétroliers, gaz naturel et dérivés du pétrole brut, sont largement utilisés pour le chauffage dans le domaine résidentiel et tertiaire, les transports, la production d'électricité, et certaines industries (métallurgie, cimenteries). Le charbon, autrefois dominant, reprend une place importante notamment dans les pays en développement rapide, quand ils en possèdent des réserves importantes. Les centrales électriques utilisant le charbon représentent dans ces pays une part majeure des nouvelles capacités construites pour répondre à la demande croissante en électricité. D'autres pays souhaitent poursuivre l'exploitation du charbon qui a joué un rôle historique dans leur développement industriel, et offre des emplois à une partie importante de la population. L'ensemble de ces combustibles fossiles – gaz naturel, pétrole et charbon – fournit actuellement près de 90 % des énergies primaires commercialisées dans le monde.

Trois facteurs éventuellement limitatifs interviennent pour ces combustibles fossiles :

- Les réserves qui progressivement s'épuisent (il faut des millions d'années pour que l'évolution géologique produise du pétrole ou du charbon à partir de la matière organique contenue dans certains sédiments). On peut situer l'épuisement du pétrole au milieu du siècle et celui du gaz avant la fin du siècle. Le charbon pourrait atteindre deux siècles. Le facteur **coût de l'énergie** sera également un facteur important mais il résultera probablement de beaucoup d'autres facteurs en plus de l'épuisement des ressources.

- Ils produisent des gaz à effet de serre, en particulier du gaz carbonique ; le charbon en produit plus que les autres, sans oublier divers autres polluants atmosphériques nocifs. La capture du gaz carbonique et son stockage (CCS) sont une nécessité, dans tous les secteurs où l'on pourra le faire, pour permettre le relais du pétrole et du gaz par le charbon. Ce stockage pérenne risque d'exiger un considérable effort de recherche, un surcoût important pour l'usage du pétrole ou du gaz (doublement du prix ?) et de poser un grave problème environnemental. Il est difficile de prévoir quand les « catastrophes naturelles », **événements abrupts** tels que canicule, sécheresse, inondation, tempête, cyclone, seront ressenties comme inacceptables par la société.

- La **sécurité des approvisionnements**, qui relève plus de la politique internationale que de la science ou de la technique. Ce problème est plus accusé pour le gaz (majoritairement transporté par gazoducs sur lesquels des pays tiers peuvent intervenir) que pour le pétrole brut et le charbon dont le transport par mer est plus souple. La France est cependant moins menacée que les pays d'Europe centrale pour le gaz, car ses approvisionnements sont plus diversifiés.

La consommation annuelle mondiale d'énergie, actuellement d'environ 10 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (10 Gtep), dépassera 20 Gtep en 2040 ou 2050, dans l'hypothèse du laisser faire (*business as usual, BAU*), si aucun accord international contraignant n'est intervenu auparavant pour limiter la consommation de combustibles fossiles et les émissions de CO₂ qui en résultent. Les estimations retenues par notre Académie dans ses rapports de 2005 et 2007 sont en accord avec les évaluations de consommation d'hydrocarbures dans les années 2030 ou 2050 faites tant par le Département de l'énergie des États-Unis que par l'Agence internationale de l'énergie.

Il convient alors de garder à l'esprit qu'une erreur considérable sur l'évaluation des réserves ultimes en pétrole et en gaz, telle que 100 milliards de tonnes d'équivalent pétrole, ne ferait que décaler de dix ans, dans un sens ou dans l'autre, l'épuisement de ces réserves, si nous ne changeons pas notre mode de vie. Ainsi, la fin de ces réserves de combustibles au cours du siècle est inéluctable. L'exigence d'un développement mondial durable et celle d'une indépendance énergétique minimale de la France et de l'Europe imposent une modification profonde de l'ampleur et des sources de notre consommation énergétique.

Les investissements des 20 prochaines années auront une influence déterminante sur la situation de la planète au milieu du siècle et même bien au-delà. La capture et le stockage du CO₂ coûteront cher et demanderont des réponses à de nombreux problèmes techniques qui ne sont pas tous prévus. Si les États laissent construire de grandes centrales thermiques au charbon, sans capture et stockage des émissions, et capables de fonctionner pendant 40 ou 60 ans, notre avenir est irrémédiablement compromis. S'il est difficile d'empêcher la construction de telles installations, il est encore bien plus difficile de les fermer prématurément. »

Question III-4 a) : En Europe : Pourra-t-on continuer à utiliser le pétrole pendant les prochaines décennies ? Pourra-t-on utiliser sans inconvénient le gaz naturel tant du point de vue des émissions de gaz carbonique que de la sécurité des approvisionnements ?

Sébastien Candé (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« Les ressources fossiles pétrole et gaz sont surtout importantes pour le transport et la production d'énergie. Ainsi par exemple, le pétrole est essentiel pour le transport aérien, et la disponibilité future d'un carburant comme le kérosène ou de substituts au kérosène, est une question centrale dans ce secteur. Plus généralement, la disponibilité du pétrole dans l'avenir dépend de nombreux facteurs. Pour analyser cette question, il faut envisager les réserves de pétrole et considérer l'évolution de la consommation et du prix. Le problème est aussi politique car les ressources, inégalement réparties dans le monde, se trouvent souvent dans des régions dont la stabilité politique n'est pas assurée. Le niveau de consommation sera aussi influencé par l'évolution de la sensibilité du public au problème des émissions de gaz à effet de serre.

Les principaux producteurs de pétrole sont les pays de l'OPEP (Arabie Saoudite, Iran, Irak, Koweït, Qatar, Emirats, Algérie, Libye, Nigéria). Ces pays assurent une

part importante (40 %) de la production mondiale. D'après une étude de BP réalisée en 2006, les réserves prouvées seraient de l'ordre de 150 Milliards de tonnes équivalent pétrole (150 Gtep) ou encore 1200 Milliards de barils (1 200 Gb, un baril de pétrole correspondant à 159 litres). Un peu moins de trois quart des réserves (743 Gb) se trouvent au Moyen Orient. Au rythme de production actuel d'environ 83 Mb par jour soit 30 Gb par an, les réserves seront épuisées en 40 ans. Selon cette étude, il ne resterait donc que quelques décennies de consommation de pétrole. La disponibilité du pétrole est souvent discutée en termes de pic de production ou «peak oil ». On se réfère ainsi aux prévisions réalisées par le géophysicien américain King Hubbert qui, constatant que la production suivait une courbe en cloche, avait conclu avec justesse que la production américaine passerait par un pic dans les années 1970. Sur le problème du « peak oil », le point de vue optimiste consiste à noter que les prévisions de raréfaction des ressources ne se sont pas réalisées dans le passé et que des réserves existent dans des gisements profonds qui pourront être exploitées avec l'amélioration des techniques d'exploration et de forage. Le point de vue pessimiste s'appuie sur les connaissances géologiques désormais très complètes et sur le fait que les découvertes majeures sont de moins en moins nombreuses. L'analyse appliquée aux ressources mondiales donnerait la date de 2020 pour le « peak oil » si on suppose des réserves totales de l'ordre de 3 000 Gb et 2030 si ces réserves sont de 4 000 Gb. D'après Yves Mathieu (IFP) (2006) le scénario le plus probable est celui où la production fluctue autour de 90 Mb/j. Cette valeur pourrait se maintenir jusqu'en 2030 grâce aux pétroles non-conventionnels (huiles lourdes, sables asphaltiques).

La question du coût du pétrole est assez complexe mais on peut s'attendre, très schématiquement, à un renchérissement avec l'épuisement des ressources les plus facilement accessibles. A la différence de la période antérieure, le coût marginal de production ne devrait plus être négligeable car il faudra exploiter des pétroles plus difficilement accessibles (grandes profondeurs, sables asphaltiques...). Ces coûts seraient de l'ordre de 30 \$/b pour la récupération de pétrole à partir de sables asphaltiques, une valeur qui devient comparable aux 80 \$/b ou 60 \$/b nécessaires à la fabrication de carburants de synthèse à partir de charbon ou de gaz naturel respectivement par procédé Fischer-Tropsch (voir plus loin). A ces coûts internes, il faudra probablement ajouter des coûts externes induits par les mesures qui seront prises pour limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les méthodes de récupération utilisées pour l'exploitation des pétroles non-conventionnels induisent des besoins d'énergie et des rejets supplémentaires de CO₂. L'internalisation de ces coûts externes et de ceux qui pourraient être induits par la capture et la séquestration du CO₂ pourraient constituer un frein à la consommation du pétrole.

Alors que la consommation de pétrole pourrait être amenée à plafonner, la consommation de gaz naturel est actuellement en plein essor avec un doublement prévu pour la prochaine décennie. On passerait ainsi des 2 Gtep/an consommés à l'heure actuelle à environ 4 Gtep en 2020. Cette croissance rapide est induite par les besoins en énergie et notamment ceux de pays émergents (Chine et Inde) mais la demande de gaz augmente aussi dans les pays développés avec une certaine désaffection pour le charbon, le désengagement de l'énergie nucléaire dans des pays comme l'Allemagne et la recherche de substituts au pétrole pour les transports terrestres. Les réserves de gaz naturel prouvées sont de l'ordre de 140 Gtep pour un total espéré de 250 Gtep. Les besoins pourraient ainsi être couverts jusqu'aux environs de 2060. Les réserves sont un peu plus uniformément réparties que celles du pétrole (70 % au Moyen Orient et dans les pays de l'ex-URSS) mais les réserves

européennes correspondent à une faible part (5 %) du total. La localisation géographique des pays exportateurs fait qu'une partie importante des ressources se trouve dans des régions sensibles politiquement, ce qui peut conduire à des difficultés d'approvisionnement, une situation illustrée par les problèmes rencontrés récemment pour les livraisons de gaz russe traversant l'Ukraine. Elle implique aussi le transport du gaz sur de grandes distances et elle est aussi une source de préoccupations portant sur la stabilité des approvisionnements. Le transport du gaz est majoritairement réalisé par gazoduc (à 90 %) ce qui consomme 2.5% de l'énergie transportée sur 1 000 km. Le gaz naturel est aussi transporté par des navires méthaniers sous forme liquéfiée (à une température de 110 K) ce qui nécessite là encore une consommation d'énergie pour la liquéfaction du gaz et pour sa gazéification ultérieure.

Constitué de 70 à 100 % de méthane (CH_4), le gaz naturel est caractérisé par de bonnes performances en matière de rejets de gaz à effet de serre (CO_2). Cela vient du fait qu'il y a quatre fois plus d'atomes d'hydrogène que d'atomes de carbone dans la molécule de méthane alors que le rapport n'est que de deux à un pour les hydrocarbures liquides tirés du pétrole. Pour la même quantité d'énergie produite, les rejets de CO_2 sont plus faibles. Le gain en termes de rejets de CO_2 peut même être amélioré en utilisant des cycles combinés dans lesquels les produits issus de la combustion sont d'abord utilisés dans une turbine à gaz fonctionnant à haute température puis servent dans un circuit plus classique à chauffer de la vapeur qui alimente un second groupe turboalternateur. Le rendement passe ainsi d'une valeur typique de 35 % à une valeur d'environ 50 % ce qui réduit encore la quantité de rejets de CO_2 pour la même quantité d'énergie. Le gaz naturel est ainsi très intéressant pour la production d'énergie électrique, parfois combinée avec l'utilisation de la chaleur résiduelle à basse température (le rendement peut alors atteindre les 85 %). Les performances sont donc très bonnes mais l'utilisation du gaz naturel dans des processus de combustion à haute température peut conduire à des niveaux importants d'émissions d'oxydes d'azote (NO_x) qu'il faut pouvoir contrôler. Cela conduit à utiliser des concepts de combustion avancés suivant un mode prémélangé pauvre. Les niveaux d'émission de NO_x sont alors réduits, mais la stabilité de la flamme est diminuée et les phénomènes d'instabilité qui peuvent apparaître doivent être maîtrisés. Les autres polluants comme les oxydes de soufre doivent aussi être traités. Il faut pour cela éliminer les composés sulfurés (H_2S) qui sont très souvent présents dans le gaz naturel. Un autre problème qui réduit l'efficacité du gaz naturel par rapport aux rejets de gaz à effet de serre est celui des fuites induites par le transport à grande distance et la distribution du gaz. Or le méthane est un gaz particulièrement efficace pour l'effet de serre (par unité de masse, il est 23 fois plus efficace que le CO_2). Les fuites ne dépasseraient pas 0.5% en masse dans les réseaux modernes mais elles pourraient être beaucoup plus importantes dans des réseaux plus anciens et moins bien entretenus, ce qui réduirait d'autant l'attractivité du gaz naturel par rapport au problème de rejets de gaz à effet de serre. »

Question III-4 b): Certains pays possédant des réserves de charbon importantes s'impliquent dans la capture des fumées et le stockage du gaz carbonique. Quels sont les enjeux dans ce domaine ? Quel rôle l'Europe et la France peuvent-elle jouer dans ce domaine ? Qu'en est-il des techniques de fabrication de carburant liquide à partir du charbon ?

Sébastien Candell (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« Le charbon est principalement utilisé pour la production d'électricité dans des grandes centrales thermiques et dans une moindre mesure pour produire de l'acier (0.6 t de charbon pour une tonne d'acier soit environ 460 millions de tonnes de charbon pour produire 780 millions de tonnes d'acier à partir de minerai de fer). Le charbon représente actuellement 22 % de l'ensemble des sources d'énergie primaire d'origine fossile et minérale. Il représente 75 %, 57 %, 24 % et 5 % des consommations d'énergie primaire respectivement en Chine, en Inde, aux Etats-Unis et en France. La France ne dispose plus de ressources de charbon facilement exploitables et elle ne tire qu'une faible part de son énergie de sa combustion.

Les réserves au niveau mondial sont considérables ce qui constitue une ressource importante (peut-être même ultime) d'énergie fossile. Cependant, l'exploitation à grande échelle de cette ressource ne pourra se faire qu'en minimisant son impact sur l'environnement global.

Les réserves prouvées de charbon dépassent 3 500 milliards de tep et sont 5 fois plus importantes que celles de pétrole ou de gaz. Alors que ces dernières plus faciles à exploiter seront épuisées vers le milieu du siècle actuel, l'épuisement des réserves de charbon ne devrait intervenir que dans plusieurs centaines d'années. Au rythme actuel de consommation de combustibles fossiles (8 milliards de tep) il faudrait environ quatre siècles pour épuiser les ressources de charbon mais beaucoup moins (170 ans) si la consommation de combustibles fossiles augmente par exemple de 1% par an. Le charbon apparaît, dans cette perspective, comme la ressource fossile ultime mais c'est aussi la plus polluante. Sa combustion génère, en plus du CO₂, des oxydes d'azote (NO_x) et de soufre (SO_x), des hydrocarbures aromatiques, des composés halogénés, des cendres et poussières, des métaux lourds.

Alors que le dépoussiérage électrostatique des fumées est efficace à 99%, la réduction des autres polluants et la capture et séquestration des gaz à effet de serre pose des problèmes plus complexes. Des technologies existent pour éliminer une part significative des SO_x et des NO_x, soit par traitement des fumées issues de la combustion dans les centrales à charbon pulvérisé (les plus courantes), soit en réalisant une combustion en lit fluidisé circulant (LFC) qui permet de réduire la température de combustion et de réaliser la désulfuration au moyen d'une injection simultanée d'additifs. La combustion du charbon génère aussi la plus grande quantité de gaz à effet de serre (CO₂) par kWh d'énergie. Ainsi, pour obtenir la même énergie, la combustion du charbon produit environ deux fois plus de CO₂ que celle du gaz naturel.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂) peut être réalisée par plusieurs voies : (1) la modernisation des installations pour améliorer leur rendement. On peut utiliser à cet effet des cycles supercritiques où la vapeur est portée à une température de 580°C et une pression de 28 MPa et obtenir un rendement de l'ordre de 45 % alors qu'il n'est actuellement que de 32 % au niveau du parc mondial et

38 % en Europe. A l'horizon 2020, il est envisagé d'utiliser des cycles « ultrasupercritiques » fonctionnant à une température encore plus élevée de 720°C et à 35 MPa, ce qui permettrait d'approcher les 50% de rendement et de diviser par 1.5 les émissions de CO₂ par kWh d'énergie. (2) la capture puis la séquestration du CO₂ est envisagée au moyen de plusieurs filières. La capture est effectuée en aval par dissolution dans une solution d'amines qui est ensuite régénérée. Cette capture est plus efficace si la combustion est réalisée à l'oxygène, ce qui augmente la concentration en CO₂ dans les fumées. Une solution plus avancée consiste à réaliser une gazéification intégrée du charbon dans un cycle combiné (IGCC ou « *Integrated Gasification Combined Cycle* »). Du gaz de synthèse (CO+H₂) est obtenu par combustion à l'oxygène. Ce gaz, après épuration sélective (H₂S, COS), alimente une turbine à gaz et la chaleur récupérée est utilisée dans une turbine à vapeur classique. La capture du CO₂ dans les effluents est facilement réalisée car sa concentration est élevée. Ce concept conduit en principe à des rendements élevés de l'ordre de 45 % mais il est complexe techniquement, sa conduite est plus délicate que celle des centrales classiques et son coût est élevé. Très subventionné aux Etats-Unis, l'IGCC est actuellement développé dans des unités de taille intermédiaire de 100 à 500 MW. Un prototype de 300 MW a été mis en place à Puertollano en Espagne avec une subvention européenne. Le concept IGCC et toutes les solutions qui conduisent à la capture du CO₂ n'ont d'intérêt que dans le cadre d'une séquestration de ce gaz. Mais la séquestration du CO₂, déjà difficile au niveau technique et économique, est subordonnée à une acceptation sociale. Il s'agit de passer à très grande échelle (les émissions de CO₂ dépassent déjà les 25 Giga tonnes par an) un procédé qui n'a été démontré que sur de très faibles quantités de gaz (de l'ordre du million de tonnes). Les difficultés sont aussi économiques car les coûts de capture et de stockage sont élevés. Le comportement à long terme du stockage géologique reste à préciser. Enfin, pour que ces solutions puissent être adoptées, il faudrait lever toutes les incertitudes associées à un enfouissement de longue durée pour obtenir l'acceptation par le public.

Malgré toutes ces problèmes, il est difficile de penser que les réserves de charbon pourront être exploitées pour produire de l'énergie sans que le CO₂ qui en résulterait ne soit capté et séquestré. Si tout le CO₂ était rejeté dans l'atmosphère (en l'absence de capture) on atteindrait un niveau de fraction volumique de CO₂ dans l'atmosphère qui serait plusieurs fois supérieur à celui qui existe actuellement (une estimation donne une valeur de 1 200 ppm, parties par million, à comparer aux 380 ppm actuels).

Une autre méthode d'utilisation du charbon qui ne résout pas le problème qui vient d'être décrit est celle de sa conversion en pétrole (CTL ou « *Coal To Liquid* »). Cette solution paraît attrayante a priori et elle peut effectivement être réalisée au moyen de procédés connus depuis longtemps. On forme d'abord du gaz de synthèse (CO+H₂) à partir de charbon, de vapeur d'eau et d'oxygène dans un réacteur à haute pression et haute température. Ce gaz est ensuite utilisé pour hydrogéner du coke dans un procédé catalytique et obtenir des hydrocarbures paraffiniques, des oléfines, du gaz de pétrole et du méthane. On peut aussi procéder par hydrogénation directe du charbon au moyen d'hydrogène dans un réacteur à haute pression en présence d'un catalyseur. Dans la synthèse de Fischer-Tropsch, le charbon est brûlé en présence d'oxygène et de vapeur d'eau. Le gaz de synthèse est purifié et passe dans un réacteur catalytique où il est converti en méthanol et hydrocarbures de poids moléculaire élevé. Le procédé peut être orienté vers la production d'essence et de substitut de gaz naturel. Dans tous ces procédés, de l'eau sous

forme vapeur constitue la source d'hydrogène qui doit être additionné au charbon pour le convertir en pétrole et en gaz. On estime que la conversion devient rentable lorsque le cours du pétrole dépasse environ 40 \$ le baril, mais cette estimation semble optimiste. Le procédé a été utilisé à grande échelle par l'Allemagne pour produire du pétrole pendant la Deuxième Guerre mondiale et il est utilisé actuellement en Afrique du Sud pour produire du pétrole et du gaz. La Chine et les Etats-Unis sont très intéressés par ces procédés car ces deux pays disposent de réserves de charbon importantes. L'Institut Français du Pétrole et le pétrolier italien ENI-technologies poursuivent des travaux sur l'amélioration du procédé.

Dans ce contexte général et bien que leurs réserves de charbon soient presque épuisées, l'Europe et la France ne peuvent se désintéresser d'un secteur qui occupera dans l'avenir (peut-être dès le milieu de ce siècle) une place centrale dans la génération combinée d'électricité, de chaleur, de matière première pour la chimie et de sources de combustibles liquides pour les transports et qui nécessitera la mise en œuvre de solutions efficaces pour la capture et la séquestration du CO₂.

III-5 Tous les grands pays font des progrès constants vers la mise au point de l'énergie photovoltaïque. La France peut-elle accroître son rôle dans ce domaine ?

Marc Fontecave (Membre de l'Académie des sciences) :

« Il ne fait pas de doute que la source d'énergie renouvelable la plus abondante, très largement supérieure aux contributions potentielles de l'énergie éolienne, géothermique ou hydroélectrique par exemple, est l'énergie solaire. Le soleil envoie sur la terre une puissance d'environ 100 000 TW, à comparer à la puissance de 13-14 TW consommés en moyenne par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. Lorsque l'on parle d'énergie solaire, en général on pense aux panneaux photovoltaïques, cette technologie qui permet de collecter l'énergie lumineuse et de la transformer en énergie électrique. L'un des enjeux est d'en diminuer le coût ; un facteur 10 est raisonnable et permettrait un développement substantiel de cette technologie. Evidemment, comme l'électricité non consommée est perdue, la question du stockage de l'électricité est également centrale et J-M Tarascon a évoqué cette question (voir III-6) en discutant des perspectives en matière de batteries, qui sont encore trop chères, avec des capacités de stockage d'énergie encore insuffisantes.

Il existe une autre façon d'exploiter l'énergie solaire. Ce n'est pas pour demain mais peut-être pour après-demain. Il s'agit de transformer l'énergie du soleil directement en énergie chimique, de la stocker sous la forme d'un carburant chimique, par exemple l'hydrogène. Ce dernier constitue, on le sait, un carburant très intéressant, à la fois en raison de la grande quantité d'énergie qu'il restitue lors de son oxydation (piles à combustibles, piles à hydrogène), et du fait que le seul sous-

produit de cette oxydation est l'eau. Il ne faut bien-sûr pas cacher les inconvénients de l'hydrogène, le plus important étant lié à son état gazeux à température et pression ambiantes, qui a des implications fortes en ce qui concerne son stockage et son transport. De nombreux projets à travers le monde s'attachent à la mise au point de nouvelles technologies de stockage et de transport de l'hydrogène et la chimie va jouer dans ces développements un rôle majeur, notamment à travers l'invention de matériaux capables par exemple d'intégrer des quantités massives d'hydrogène dans des volumes réduits (matériaux solides poreux) ou l'élaboration de procédés de synthèse de molécules à forte densité d'hydrogène (boranes, hydrures métalliques).

La conversion de l'énergie solaire en carburant est en fait admirablement réalisée par le monde vivant qui utilise en permanence le soleil pour transformer l'eau et le dioxyde de carbone en molécules à haute valeur énergétique qu'on retrouve dans la biomasse. Certains organismes vivants, comme les microalgues ou les cyanobactéries, ont même la capacité de réaliser une simple photolyse de l'eau : ils utilisent l'énergie solaire pour transformer l'eau en oxygène et en hydrogène. Parce que l'eau n'absorbe pas les photons du soleil et parce que les processus mis en jeu dans cette photolyse sont des processus multiélectroniques complexes, les microorganismes réussissent ce tour de force car ils possèdent des systèmes enzymatiques incroyablement sophistiqués et efficaces pour collecter ces photons, traduire cette absorption de lumière en énergie chimique et pour catalyser les réactions de transfert d'électrons, le photosystème pour l'oxydation de l'eau en oxygène et les hydrogénases pour la réduction de l'eau en hydrogène. Ce qui est remarquable, c'est que ces systèmes utilisent des métaux abondants comme le manganèse, le nickel ou le fer alors qu'aujourd'hui les chimistes utilisent, dans les dispositifs d'électrolyse de l'eau ou les piles à combustible, des métaux nobles comme le platine, très chers et peu abondants dans la croûte terrestre. On oublie souvent de dire qu'il n'y a pas de futur pour une économie à hydrogène si on ne résout pas ces problèmes de catalyseurs. Il y a aujourd'hui environ 700 millions de véhicules à la surface de la terre. Si on les fait fonctionner avec une pile à hydrogène, même en intégrant un taux de recyclage du platine de 50%, il n'y aura plus de platine disponible au bout de 15 ans.

La connaissance de ces systèmes naturels, photosystème et hydrogénase, que les biologistes et chimistes ont acquise au cours des 30 dernières années, alliée à la puissance de la chimie bioinspirée, qui permet de traduire les principes de fonctionnement d'un site actif d'enzyme en photocatalyseurs originaux, utilisant des métaux non nobles, conduit à penser, un peu partout dans le monde, que la photosynthèse artificielle est à notre portée. En témoignent certains grands programmes de recherche aux Etats-Unis impliquant les centres de recherche du Ministère de l'Energie (DoE) ou des universités prestigieuses comme CalTech, MIT, en Europe avec le projet SolarH2 et dans de nombreux pays européens. Transformer l'eau en hydrogène simplement en utilisant la lumière du soleil ne sera bientôt plus un rêve. Des résultats très encourageants dans ce sens ont fait l'objet de publications dans des revues comme Science et Nature très récemment. »

Jacques Friedel (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'intérêt pour ce domaine s'est développé en France lors de la première crise de l'énergie pétrolière des années 1970. Une conférence internationale organisée à l'époque à Bucarest par la Société Européenne de Physique sous la présidence de H. Casimir (alors Associé Etranger de l'Académie des sciences) soulignait déjà trois aspects différents, repris récemment dans un rapport largement distribué de deux Nobels américains, W. Kohn et A. Heeger de Californie :

Collecte de l'énergie solaire par procédés optoélectroniques.

La lumière solaire excite les électrons d'un semiconducteur à travers une bande d'énergie interdite, ce qui change localement son potentiel, dont on peut extraire une énergie électrique. Un grand nombre de semiconducteurs ont été développés, à commencer par les composés AsGa pour les cellules solaires utilisées dans l'espace, parce que, dans ce corps, l'excitation électronique est directe et facile dans le visible. Le silicium a été beaucoup étudié parce que plus facile à produire, sous forme amorphe, ou polycristalline ou en couches nanométriques. Des progrès peuvent encore être espérés dans des dispositifs à couches nanométriques ou dans l'emploi systématique de polymères de structure et de dopage convenables. La production des plaques mises au point actuellement permet une collecte locale sur le toit ou les murs d'un bâtiment et notamment dans les villages isolés. La production, jusqu'ici assez minime, au niveau mondial, devrait rejoindre dans quelques décennies le niveau de la production éolienne. Un plan récemment mis en avant propose de capter une grande quantité d'énergie solaire dans le Sahara pour le redistribuer en Europe mais semble largement prématuré. La difficulté principale pour faire jouer un rôle dominant à ces deux énergies est en effet leur prix actuel, indépendamment du problème de stockage pendant la nuit pour le soleil (ou l'absence de vent pour l'éolien). Ce problème de stockage ne se résout facilement qu'en présence d'un réseau parallèle majoritaire, fonctionnant sur d'autres sources (combustibles fossiles, nucléaire).

Procédés de chauffage direct par le soleil.

Ce sont les plus anciens, qui expliquent notamment pourquoi les maisons ont peu de chauffage d'appoint dans le midi de la France. De nouveaux procédés de construction (nouveaux matériaux, nouvelles structures notamment de double vitrage), couplage avec une source froide souterraine, permettent d'utiliser mieux la chaleur apportée par le soleil, ou minimisent le refroidissement constaté la nuit. Avec une gestion électronique automatique, il y a là, avec l'adjonction éventuelle de panneaux solaires, une nouvelle méthode de construction en développement actuellement et qui peut sans doute représenter une part très sensible des dépenses actuelles d'isolation et de chauffage des bâtiments. Mais les temps impliqués, liés au renouvellement des bâtiments, sont longs et l'optimisation n'est sans doute pas encore atteinte.

Des tentatives anciennes comme le four solaire d'Odeillo ou l'utilisation par le physicien russe Joffé du pouvoir thermoélectrique développé par chauffage de corps idoines, lancées dans les années 1970, n'avaient pas abouti à des réalisations industrielles. Elles sont aujourd'hui devenues des réalités industrielles et commerciales sous l'appellation de CSP (Concentrated Solar Power).

Réactions chimiques

La nature utilise depuis très longtemps l'énergie solaire dans des réactions chimiques, la plus connue étant l'absorption du CO₂ par la chlorophylle dans le développement de la végétation. Un chercheur de la General Electric Co estimait

ainsi en 1970 qu'un Américain moyen du XIX^e siècle dépensait autant d'énergie solaire qu'un de ses compatriotes du XX^e siècle entre sa nourriture, celle de ses chevaux et le bois de chauffage. Indépendamment des biocarburants traités dans la question 11, d'autres réactions chimiques produites par l'énergie solaire pourraient être utilisées en parallèle avec la conversion photoélectronique directe évoquée plus haut. Des travaux de longue haleine ont été entrepris dans ce but, notamment en Australie ».

Antoine Labeyrie (Membre de l'Académie des sciences) :

« Parmi les énergies renouvelables, celle qui provient du soleil par l'intermédiaire des panneaux photovoltaïques est particulièrement intéressante car elle nous rapproche de la voie naturelle qu'est la photosynthèse biologique. Certes, ses voies de mise en oeuvre sont encore bien différentes des réactions photochimiques compliquées que la nature a fait évoluer sur Terre depuis quelques milliards d'années, mais elles pourraient converger ou s'hybrider avec elles. La nature biologique, surtout végétale mais aussi en symbiose animal-végétal comme chez les lichens, des méduses et les coquillages tridacnes géants, etc..., utilise la lumière du soleil pour produire son énergie, mais sous la forme de sucre essentiellement ou d'huiles, alors que les photopiles de notre industrie produisent du courant électrique. Les deux formes ne sont pas foncièrement incompatibles : les poissons électriques gymnotes convertissent le sucre en électricité, et les piles à combustible en font autant à partir de l'hydrogène ou du méthanol, etc... Des panneaux solaires produisent de l'hydrogène, et pourront sans doute produire du sucre, ou encore de l'huile comme certains panneaux à micro-algues récemment expérimentés.

Aujourd'hui, la fabrication des panneaux photovoltaïques croît de façon spectaculaire, avec un doublement tous les deux ans. Pendant l'année 2009, c'est déjà l'équivalent en production électrique de plusieurs centrales nucléaires qui a ainsi été ajouté au parc existant de photopiles dans le monde. En 2021, avec la croissance régulière que prévoient les fabricants, ce nombre pourrait atteindre plusieurs centaines. Les compagnies électriques qui annoncent la revente en gros d'électricité solaire mentionnent les avantages suivants : suppression des risques liés aux prix du pétrole, de l'uranium, et des permis d'émission de carbone, limitations minimales pour les sites de captage, absence d'utilisation d'eau, et durée de construction réduite.

Pourtant l'électricité solaire reste aujourd'hui plus coûteuse que celle du réseau, mais les experts estiment que ce ne sera plus le cas en 2015. Avec la baisse continue du coût des photopiles et systèmes associés, il est prévu que la "parité réseau" sera atteinte à cette date. C'est déjà le cas sur des îles comme Hawaï et dans le sud de l'Italie.

Un autre aspect fascinant du photovoltaïque est la floraison de voies différentes que cette approche a inspiré aux chercheurs, d'abord dans des laboratoires de physique, puis de chimie et maintenant de biochimie, génie génétique, etc... Depuis quelques années, un nombre croissant de chercheurs imaginent de nouvelles façons de faire des photopiles, avec de nouveaux matériaux dont certains se rapprochent de

ceux utilisés par la nature. Après les premières photopiles en silicium, qu'il fallait laborieusement scier en fines plaquettes, sont apparues des photopiles en couches minces de matériaux différents: silicium amorphe, CuInSe, CdTe, TiO₂ dopé, nanoparticules, fullerenes, etc... . La liste des possibilités semble infinie, et l'émulation qui en résulte dans les laboratoires puis dans l'industrie contribue à faire baisser les coûts et à accélérer la progression des surfaces équipées .

Mais il ne faudrait pas que ces surfaces au soleil prennent la place de la verdure . Ce n'est pas nécessaire, car les toits, façades et autres infra-structures existantes peuvent suffire à produire l'électricité nécessaire à la civilisation. Et il y a sur chaque continent des déserts bien ensoleillés , dont une petite partie suffirait à alimenter la civilisation qui les entoure.

Les chimistes, biochimistes et généticiens travaillent aussi sur le problème connexe du stockage électrique, qu'il serait fort utile de pouvoir utiliser pour s'accommoder, comme le fait la nature, des variations diurnes et saisonnières d'ensoleillement. Il est efficacement résolu par celle-ci, par exemple sous la forme d'une betterave à sucre qui passe l'hiver sous la neige avant d'alimenter au printemps la croissance de nouvelles feuilles. Les versions artificielles de la chimie naturelle qui récupère l'énergie au printemps, c'est ce que l'on appelle les piles à combustible, qui récupèrent par exemple l'électricité que des photopiles ont investi pour produire de l'hydrogène. Elles-mêmes commencent tout juste à exploiter aussi les extraordinaires nano-machines que sont les enzymes, perfectionnés par des milliards d'années d'évolution. C'est un autre élément de la convergence qui semble s'amorcer entre les voies du vivant et celles de notre industrie la plus évoluée, la nanotechnologie, vers de nouvelles filières de captation et stockage de l'énergie solaire .

L'Espagne, l'Allemagne, le Japon et les Etats-Unis dominent l'industrie photovoltaïque. La France pourra-t-elle rattraper ceux qui ont investi avant elle dans la recherche et le développement ? Ou bien dépendrons-nous de l'importation de panneaux photovoltaïques qui vont produire une part croissante de notre électricité ? Dans le foisonnement actuel des procédés, il n'est pas exclu que de bonnes idées jaillissent de nos laboratoires en matière solaire, et que notre industrie soit capable de les mettre en oeuvre.

Parmi les nombreuses filières du photovoltaïque qui entrent en concurrence, il est difficile de prédire lesquelles sont les plus prometteuses, compte-tenu des nouvelles idées qui peuvent émerger dans un mois ou dans un an . Et cela ne favorise pas l'investissement privé, qui se concentre plutôt sur l'importation de photopiles étrangères pour équiper les toits et les centrales solaires en France. Mais les filières photovoltaïques déjà industrialisées dans d'autres pays pourraient aussi faire l'objet de fabrication en France, ce qui devrait ultérieurement permettre à l'industrie de notre pays d'intégrer plus facilement les améliorations prévisibles.

Ces évolutions indiquent que les voies photovoltaïques et de la photosynthèse artificielle ou domestiquée vont jouer un rôle majeur dans notre civilisation, notamment avec l'approvisionnement local qu'elles permettent, même pour les grandes villes et les zones industrielles. »

Didier Roux (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'énergie solaire se décline en trois grandes applications : le solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire, le solaire à concentration pour produire de l'électricité industriellement, le solaire photovoltaïque pour une production diffuse d'électricité.

Le solaire thermique permet de produire de l'eau chaude à température modérée pour les besoins sanitaires d'un habitat. C'est une technologie classique qui se développe bien et ne pose pas de problématiques particulières sauf peut-être dans sa version couplée avec le photovoltaïque (voir plus loin).

Le solaire à concentration (ou solaire thermodynamique) est une technologie qui concentre le rayonnement solaire sur un liquide caloporteur (qui transporte la chaleur) et le chauffe à relativement haute température (plusieurs centaines de degrés). Avec cette chaleur transportée par ce liquide on peut évaporer de l'eau et alimenter une turbine fabriquant de l'électricité comme avec toute autre source de chaleur (gaz, fioul, charbon, nucléaire...). Plusieurs techniques utilisant des miroirs plans où courbés peuvent être utilisées. Les projets se développent, pour des raisons économiques, principalement dans les pays où l'ensoleillement est important et la surface au sol facilement accessible, par exemple les pays de l'Arc Méditerranéen.

Le solaire photovoltaïque est certainement le domaine où l'on peut espérer les progrès scientifiques et technologiques les plus significatifs dans les années à venir. Il a été développé sur la base de l'effet photoélectrique (pour l'explication duquel Albert Einstein a eu le prix Nobel en 1921), dans les années 50-60 pour avoir une source d'électricité afin d'alimenter les satellites. C'est le seul exemple où l'énergie électromagnétique du rayonnement du soleil est transformée directement (sans passer par un mouvement mécanique) en énergie électrique. Le rendement actuel (i.e. le pourcentage d'énergie électromagnétique transformée en énergie électrique) des différentes cellules varie énormément de quelques % à plus de 40% en laboratoire dans le meilleur des cas. Il n'y a pas de limites théoriques à l'amélioration de ce rendement et les cellules dites multi jonctions ont fait des progrès spectaculaires. Cette technologie de production électrique a une particularité qui la rend quasiment unique : il n'y a pas de gain financier en concentrant la production de cette électricité (pas d'économie d'échelle). On peut installer des panneaux photovoltaïques indifféremment sous la forme d'usine de production en équipant des champs de panneaux solaires mais aussi en produisant localement à partir de petites unités disposées sur les toits ou le sol. Ces panneaux installés dans des unités locales permettent : soit d'alimenter un équipement non relié au réseau, soit de produire de l'électricité de façon diffuse en alimentant ainsi le réseau avec des sources disséminées. Ce caractère diffus de la production est une particularité qui permet à la fois de varier les sources de production sur un réseau mais aussi de faire appel à l'investissement direct des citoyens individuellement. Pour avoir une réalité économique durable ne nécessitant pas d'aides des états il faut baisser encore fortement les coûts des modules et de leur installation. L'objectif est d'arriver à un coût de production d'électricité par des panneaux photovoltaïques identique à celui du prix d'achat de l'électricité sur le réseau ; notons que dans certains cas nous n'en sommes pas loin (c'est le cas de certains pays où l'électricité est chère et le soleil abondant). La technologie largement dominante utilise du silicium mono cristallin ou poly cristallin, c'est celle développée dès son origine pour les satellites. De nouvelles

technologies apparaissent sur le marché qui, à terme, permettront de faire baisser les coûts. Les nouvelles technologies les plus avancées sont celles nommées couches minces qui permettent, en déposant sur un support rigide ou flexible quelques microns de film d'un matériau semi conducteur, de réaliser des cellules. Pour le moment les technologies couches minces industrielles sont celles à base de silicium amorphes, de CdTe (Tellure de Cadmium) et de CIGS (mélange de Cuivre Indium, Gallium et de Selenium). Notons que d'un point de vue scientifique, on peut encore s'attendre dans le domaine des couches minces photovoltaïques à des ruptures technologiques. En effet, nous sommes loin d'avoir exploré (et même découvert) tous les matériaux semi conducteurs ayant des propriétés adaptées au photovoltaïque ; le cas du CIGS à 4 constituants est de ce point de vue emblématique car il préfigure (comme pour les supraconducteurs hautes températures) que des alliages composés de plusieurs constituants (> 2) peuvent avoir des propriétés bien meilleures que des corps purs ou des mélanges binaires. Compte tenu que l'on voit se développer de nouvelles techniques d'échantillonnage à haut débit particulièrement adaptées aux films minces composés de mélanges, de nouvelles découvertes sont possibles permettant de trouver éventuellement de nouveaux semi conducteurs à très bon rendement et fabricables industriellement à des coûts faibles. Plus récemment de nouvelles technologies basées sur des molécules organiques (polymères conducteurs) ou mixtes minéral/organique (cellules dites de Grätzel) donnent aussi l'espoir de développer des procédés de fabrication peu coûteux ».

III-6 Que pourrions-nous faire en France de plus pour résoudre les problèmes énergétiques et déployer leurs solutions à l'échelle industrielle, soit seuls, soit dans un cadre européen ?

Robert Dautray (Membre de l'Académie des sciences) :

« En ce qui concerne les recherches en énergie, nous pouvons avoir un repère européen : de grands laboratoires de l'Union Européenne se sont concertés, pour mener ensemble, avec un seul laboratoire par pays (pour la France le CEA avec l'IFP, pour l'Allemagne, une nouvelle institution , appelée Association des laboratoires de Julich et de Karlsruhe, tous deux anciens laboratoires nucléaires, reconvertis aux disciplines scientifiques demandant de grands instruments, etc..), une Alliance Européenne de Recherches concernant l'Énergie (European Energy Research Agency, EERA, dont le site est EERA-set.eu).

Dans un premier temps, les domaines de recherche choisis par l'EERA sont :

- Sciences de base pour l'énergie
- Biocarburants
- Charbon propre-capture du CO₂
- Charbon propre-stockage du CO₂

- Charbon propre-autres aspects (par exemple, du charbon à des liquides combustibles)
- Concentration du flux lumineux solaire
- Puissance électrique : stockage, transport et réseaux
- Piles à combustibles
- Energie géothermique
- Energie des mers
- Matériaux pour le nucléaire
- Energie solaire par la voie photovoltaïque
- Réseaux de transmission et de distribution pour le futur
- Energie du vent.

Les premiers travaux de ces programmes seraient lancés début 2010.

Pour la France, on peut faire trois constatations :

Première constatation :

L'importance de l'électricité en France grâce au parc électronucléaire du producteur national actuel.

Il faudra relier les sources primaires *d'énergies nouvelles* aux *nouveaux utilisateurs* de courant électrique (voitures tout électrique, immeubles « bas carbone » et photovoltaïque, photothermique), donc créer une nouvelle grille du Réseau électrique de transport et de distribution d'électricité, intelligente et s'adaptant aux intermittences des consommateurs et des sources primaires d'énergie.

Cette grille, sans doute unique pour toute la France métropolitaine, doit aussi pouvoir stocker, transporter et distribuer l'électricité dans les deux sens (par exemple, une maison équipée de panneaux photovoltaïque est consommatrice d'électricité la nuit et fournisseur le jour). La grille utilisera des capteurs mesurant les courants électriques, des compteurs « intelligents », les données météorologiques pour prévoir les futurs besoins, etc., Toutes ces informations seront raccordées à des calculateurs informatiques ; ceux-ci seront également reliés à diverses sources d'informations (la mémoire du passé, par exemple), afin de prévoir les évolutions non seulement des sources primaires d'énergie mais aussi des besoins des consommateurs. Cette grille, dite « grille intelligente » (« smart grid »), permettra d'optimiser les services énergétiques pour les consommateurs suivant divers critères fixés pour le bien général : économies d'énergie, coût pour le consommateur, sécurité de fonctionnement, rejet minimal de déchets, services rendus à d'autres réseaux extérieurs (par exemple, la fourniture d'électricité à des régions proches de notre pays par l'interconnexion des grilles, ce qui est déjà une réalité pour les Réseaux électriques de certains de nos voisins frontaliers), etc.

Les transformations de cette grille demanderont une recherche scientifique, technique, une mise au point industrielle et un déploiement, tout cela avec des critères d'optimisation liés aux *tarifications*, et mettront deux à trois décennies pour parvenir à une adaptation optimale.

Deuxième constatation :

La limitation de toutes ces techniques énergétiques est toujours liée aux performances des matériaux de structure (les aciers inoxydables et leur corrosion, sous fatigue mécanique, à haute température, etc.) et des matériaux

d'emploi des voitures (électrodes des batteries électriques aux ions lithium (Li^+) incluant des nanomatériaux afin que les électrodes ne se bornent plus seulement à des phénomènes de surface, mais soient complètement pénétrées par les ions ; mêmes procédés pour augmenter les performances des capacités électrochimiques {pour les courtes pointes d'efforts supplémentaires}), membranes pour la désalinisation de l'eau, combustibles des surgénérateurs, etc.). C'est un domaine où la France doit faire un effort de recherche, de formation des hommes, de création de laboratoires, etc., effort qui, au bout d'une à deux décennie(s), portera ses fruits. Notons qu'aujourd'hui, qui dit matériaux, dit non seulement physique de l'état solide, mais aussi chimie, physico-chimie, calcul scientifique, techniques de fabrication, et pour chacun de ces domaines, à toutes les échelles de taille, etc., donc recherche fondamentale.

Troisième constatation :

Depuis le premier choc pétrolier, on nous répète que le principal gisement d'énergie de la France est celui des économies d'énergie. L'expérience nous montre que cela ne peut fonctionner que si c'est l'affaire de chacun. Mais pour cela, il faut que chacun puisse accéder à ses consommations et à leurs coûts afin de mesurer l'effet de son effort. Le producteur national d'électricité a mis au point toutes les techniques pour effectuer progressivement cela chez tous les particuliers.

Conclusion : La durée de l'ensemble de ces recherches sera au mieux d'une à deux décennie(s) auxquelles il faudra ajouter la durée des développements techniques, de l'industrialisation, dont les usines pilotes éventuelles, et du déploiement, soit environ deux à trois décennies de plus. Le message principal de ce texte est donc qu'avant de faire des investissements industriels, il faut commencer par développer la recherche pendant la prochaine décennie. »

Jean-Marie Tarascon (Membre de l'Académie des sciences) :

« **Stockage de l'énergie :** Face à la prise de conscience de la nature provisoire des sources d'énergie fossile et du tort irréversible causé à l'environnement, un enjeu des décennies à venir est le couplage des sources d'énergie renouvelables avec des systèmes de stockage beaucoup plus performants qu'aujourd'hui dans les réseaux de distribution de l'électricité. Développer de nouveaux systèmes de stockage de l'énergie, tant pour le transport que pour les réseaux de distribution, devient donc une priorité. Bien que les accumulateurs à ions lithium qui envahissent aujourd'hui le marché des portables constituent la plus grande avancée dans le domaine du stockage de l'énergie de ce dernier siècle, leurs performances ne pourront répondre aux besoins technologiques de demain. Développer de nouveaux concepts/matériaux devient donc une réalité.

Les batteries commerciales à ions lithium Li^+ reposent, à ce jour, sur l'utilisation de composés dits « d'insertion » (e.g. matériaux capables d'accepter et de relâcher réversiblement les ions lithium tout en conservant la même charpente structurale) comme électrodes positive et négative. Leur choix contrôle la tension de cellule ainsi que sa capacité et finalement la puissance et l'énergie électrique. Malgré la

richesse de la chimie des matériaux lithiés et la variété des mécanismes réactionnels d'oxydation/réduction, les multiples critères de sélection pour une électrode d'insertion n'ont permis à ce jour de retenir que quelques matériaux: $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co})\text{O}_2$ (200 mAh/g, 3,9 V) et LiMn_2O_4 (140 mAh, 4,1 V) pour l'électrode positive et le graphite (372 mAh/g, <0,4 V) pour l'électrode négative, parmi les centaines étudiés depuis 30 ans.

La situation évolua brusquement vers 2000 grâce à la mise en évidence de réactions se produisant à l'échelle nanométrique dans certains matériaux d'électrode, modifiant considérablement nos perspectives et ouvrant de nombreuses opportunités dont nous apprécions déjà les premières réalisations commerciales. Une réduction de la taille des particules a permis entre autres **1)** d'insérer réversiblement l'ion Li^+ dans les phases $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ hématite ou TiO_2 rutile, ce qui était jusque là impossible, **2)** d'utiliser des alliages à large expansion de volume et **3)** de donner accès à de nouveaux mécanismes réactionnels tels les réactions de conversion qui ont permis de dépasser la limite de 1 électron par métal de transition associée aux réactions d'insertion.

Ce changement d'échelle a mis un terme à la lenteur du domaine du stockage de l'énergie puisqu'en l'espace d'une dizaine d'années, les nanomatériaux sont passés du stade d'objets de laboratoire à la commercialisation de systèmes très performants. La technologie d'accumulateur NEXELION, dont l'électrode négative à base de nanomatériaux lui assure une densité d'énergie volumique accrue très appréciée pour l'électronique portable, n'aurait jamais vu le jour sans cette évolution. Ce passage à l'échelle nanométrique a également permis la mise au point d'électrodes de LiFePO_4 à hautes performances, notamment en puissance, ce qui conduit à la commercialisation en 2006 par la société *A123 Systems* d'accumulateurs à forte densité de puissance pour des applications portables (outillage portatifs) et pour l'alimentation de véhicules électriques (Tesla).

Beaucoup d'espoir repose aujourd'hui sur les accumulateurs à ions lithium qui, grâce à l'apport des matériaux nanométriques, sont devenus plus attractifs pour des applications grands volumes. Cependant, vu l'abondance terrestre des matériaux utilisés actuellement (LiCoO_2) ou le coût indirect en CO_2 pour leur fabrication (LiFePO_4), il va de soi que toutes les recherches actuelles sur les matériaux nanométriques doivent se situer dans le contexte du développement durable, ce qui oriente nécessairement leur élaboration vers des approches de synthèse innovantes en ayant notamment recours à certains préceptes de la « chimie verte ».

Ceci justifie la tendance actuelle reposant sur des approches bio-inspirées, biomimétiques et/ou bio-assistées susceptibles d'offrir une nouvelle vie à des matériaux jusqu'à présent négligés ou d'un intérêt jugé pour l'instant limité pour des applications liées à l'énergie. Bien que pouvant être à priori déroutant, ce retour vers les organismes les plus primitifs (virus, algues unicellulaires, bactéries) est un challenge intellectuel fascinant. Le matériau d'électrode LiFePO_4 , tant présenté comme la solution idéale pour nos accumulateurs de demain, se prête parfaitement à ces approches dans la mesure où le fer et les phosphates sont à la fois des constituants géologiques et biologiques majeurs, et que sa précipitation se fait en milieu aqueux et à un pH proche de 7. Les travaux récents et spectaculaires d'Angela Belcher, qui ont conduit à l'élaboration de matériaux d'électrodes nanométriques (Co_3O_4 , MnO_2 , FePO_4) via l'aide de virus et de bactéries, s'inscrivent dans cette nouvelle perspective. Egalement dans cette perspective du développement durable s'inscrivent les travaux actuels sur les technologies métal-air et notamment Li-air qui est très attractive en raison de son énergie théorique élevée

dépassant d'au moins un facteur 5 par rapport à la technologie à ions Li. Espérons que les avancées des recherches sur ce sujet prisé mais complexe seront à la hauteur de nos espérances dans les prochaines années

Enfin on ne pourrait faire sans évoquer la polémique sur les limites des ressources terrestres en Lithium. Peu importe la divergence des calculs sur les réserves terrestres actuelles, il s'agit d'un point important que nous devons dès aujourd'hui examiner en promouvant de nouvelles idées et de nouveaux concepts comme, par exemple, le développement de systèmes à ions sodium en raison de l'abondance de cet élément.

En résumé, les technologies de batterie, dont la maîtrise et l'amélioration sont essentielles pour favoriser l'utilisation des énergies renouvelables et le développement du transport électrique, ont un bel avenir devant elles si elles restent en constante évolution. Cette dernière nécessitera la poursuite de recherches se trouvant à la croisée de plusieurs disciplines, impliquant des électrochimistes, des métallurgistes, des scientifiques du domaine des matériaux et des chimistes organiciens.

Bernard Tissot (Membre de l'Académie des sciences) :

« Il est urgent de développer un effort de recherche scientifique et technique très ambitieux pour pallier tous les manques actuels, tant sur les disciplines de l'énergie que sur le climat qu'on ne connaît pas suffisamment pour les besoins prévisionnels. Science et technologie sont indispensables, mais l'économie et la sociologie devraient, elles aussi, faire l'objet d'une recherche nouvelle, pour faire face à un bouleversement majeur de nos modes de vie, en assurant la relève de nos sources primaires d'énergie.

La sobriété énergétique globale est une des voies pour l'atteindre, elle ne constitue pas une fin en soi. On peut ainsi envisager des scénarios qui permettent la poursuite d'un certain développement mondial, où l'électricité serait le vecteur majeur de notre énergie. C'est une évolution dans le sens des tendances actuelles, c'est-à-dire vers l'électricité, et non à contre-sens de celles-ci.

L'électricité est un vecteur d'énergie privilégié dans les pays industrialisés, au point que sa disposition est devenue une condition nécessaire pour toutes les activités de la vie courante (eau potable, transports publics, communication, etc.), de l'industrie et du commerce. Elle prend rapidement une importance croissante dans les pays en transition et la demande mondiale pourrait tripler d'ici 2050. Notre problème n'est donc pas seulement de remplacer les centrales existantes, mais aussi d'en construire de nouvelles, supplémentaires, capables de répondre aux besoins en électricité « concentrée » pour alimenter l'industrie ainsi que les très grandes villes (la majeure partie des habitants du monde vit maintenant en milieu urbain) sans épuiser trop rapidement nos ressources et augmenter d'autant nos émissions de gaz à effet de serre. Les centrales thermiques à charbon ou à gaz, à condition de séparer et stocker de façon pérenne les gaz à effet de serre produits, les énergies éolienne et solaire, à condition de savoir stocker l'électricité produite, pourront participer à cet effort, ainsi que la géothermie dans les régions favorables, notamment en Islande. Mais les principales sources d'énergie ne produisant pas de gaz à effet de serre sont

l'hydroélectricité, si on dispose encore de sites appropriés, et les centrales nucléaires.

Ces dernières exigent avant tout une gestion rigoureuse des déchets nucléaires, domaine où la Suède et la France sont les pays les plus avancés. De leur côté, les recherches internationales concernant les installations nucléaires surgénératrices visent à accroître les ressources en matière fissile grâce aux réacteurs à neutrons rapides, et à assurer ainsi de l'énergie pour plusieurs millénaires.

L'avenir des centrales thermiques au charbon dépendra des recherches en cours sur la séparation et le stockage pérenne du CO₂ issu de la combustion, qui nécessiteront un effort long et soutenu – vu la complexité du problème – pour utiliser les ressources de charbon sans interférer avec les problèmes climatiques.

Le stockage de l'énergie, et plus particulièrement de l'électricité, constituerait un facteur essentiel pour valoriser les énergies intermittentes (éolienne ou solaire) et changerait la donne en leur faveur. En l'absence de cette possibilité, ces énergies obligent à entretenir une capacité de réserve, reposant sur des centrales au gaz ou au charbon se déclenchant à la demande, ce qui accroît les investissements, la pollution et les émissions de gaz à effet de serre. »

IV - ENVIRONNEMENT, DEMOGRAPHIE, EAU, ALIMENTATION, SANTE

La population croissante confrontée à un accès à l'eau douce de plus en plus restreint (tant par la démographie que par les sécheresses) voit son alimentation et sa santé menacées. Un bilan prospectif en est fait ici :

IV-1 Quelles vont être les conséquences dans le monde des évolutions démographiques respectives par grandes zones continentales ? La France peut-elle jouer un rôle positif ?

Henri Léridon (Correspondant de l'Académie des sciences) :

« La population mondiale a connu, au cours du XX^e siècle, une évolution exceptionnelle. De 1,7 milliard en 1900, elle est passée à 6,1 milliards en 2000. Son taux d'accroissement annuel a atteint un maximum historique au début des années 1960 : 2% (rythme qui correspond à un doublement tous les 35 ans) ; depuis il est revenu à 1,2%. Cet épisode résulte de la diffusion, à travers presque tous les pays du monde, des progrès dans la lutte contre les causes majeures de mortalité, qui ont donc entraîné une baisse générale de la mortalité, sans que la natalité ne connaisse une évolution toujours aussi rapide. Le taux d'accroissement étant égal à la différence entre les taux de natalité et de mortalité (aux migrations près, évidemment

nulles au niveau mondial), il a pu atteindre temporairement des valeurs élevées, dépassant 3 % dans certains pays, pendant une durée plus ou moins longue. Cette « parenthèse » devrait se refermer prochainement : selon les projections des divers organismes internationaux, la population mondiale ne devrait guère dépasser 9 milliards en 2050, et elle pourrait ensuite soit se stabiliser soit commencer à diminuer.

Ces perspectives s'appuient sur les tendances actuelles de la fécondité et de la mortalité. Pour *la fécondité*, on constate que, dans la majorité des pays développés, mais aussi en Chine, les femmes ont déjà en moyenne moins de deux enfants. Au Brésil, en Iran, en Turquie, au Vietnam... le taux de fécondité est exactement de 2 enfants, et dans plusieurs états de l'Inde (Andhra Pradesh, Bengale occidental, Pendjab, Kerala) il est inférieur à 2,4. Restent nettement en arrière de cette évolution la majorité des pays d'Afrique subsaharienne et certains en Asie (Pakistan, Philippines) et au Proche Orient.... Globalement, la fécondité est passée de 5 enfants par femme en 1950 à 2,6 aujourd'hui, et l'on peut tabler sur un niveau moyen proche de 2 enfants en 2050.

Côté *mortalité* les changements ont été aussi spectaculaires. L'espérance de vie est passée de 47 ans à 68 ans (+ 21 ans) en moyenne mondiale en l'espace de 50 ans, grâce à l'effondrement des maladies infectieuses obtenu par une meilleure prévention (vaccinations généralisées) et de meilleurs traitements médicaux. Les progrès seront plus limités au cours des 50 prochaines années (8 ans). Ils dépendront de la réduction des maladies de dégénérescence (cardio-vasculaires, cancers...), plutôt concentrées après 50 ans, et des maladies de société (alcoolisme, tabagisme, accidents...). Dans les pays en développement, des efforts devront encore être faits pour réduire la mortalité infantile et dans l'enfance : soins à l'accouchement, vaccinations, amélioration de la nutrition, développement des infrastructures médicales...

L'épidémie de sida, à laquelle certains sont confrontés depuis une quinzaine d'années, a eu des conséquences parfois catastrophiques : en Afrique du Sud près de 20 ans d'espérance de vie ont été perdus et le taux de croissance a été ramené à moins de 1 %. Notons toutefois *qu'à l'échelle du continent africain* l'impact sur la croissance démographique reste assez faible, et qu'il en sera sans doute de même dans les prochaines décennies.

Ces bouleversements auront d'importantes conséquences. Au plan démographique, tout d'abord. Les rythmes de croissance n'ont pas été les mêmes dans tous les pays au cours du dernier siècle : il en résultera une *redistribution de la population mondiale* entre les grandes régions du monde. L'Europe et l'Amérique du Nord représentaient 21 % de la population mondiale en 1800, 30 % en 1900 mais seulement 17 % en 2000 : la proportion ne dépassera pas 13 % en 2050. A cette date, l'Inde (état le plus peuplé) et la Chine abriteront un tiers de la population totale, le reste de l'Asie presque un quart (24 %), l'Afrique 22 % et l'Amérique latine 8 %.

L'Europe, Russie comprise, ne représentera plus que 5 % de la population mondiale, la France moins de 1 % (mais 15 % de la population européenne).

La seconde conséquence est un *vieillissement généralisé des populations*, c'est-à-dire l'augmentation de la proportion des personnes âgées de plus de 60 ou 65 ans. La hausse actuelle a trois origines. D'une part, la baisse (passée) de la fécondité. Toutes choses égales par ailleurs, un pays à faible fécondité a une structure par âge plus « vieille » qu'un pays à forte fécondité. C'est la raison pour laquelle la population française, qui avait été la première à réduire sa fécondité, a longtemps détenu le

record du pourcentage de personnes âgées. D'autre part, les irrégularités de la pyramide des âges, résultant de fluctuations dans le nombre des naissances et des décès (comme la Première Guerre mondiale ou le baby-boom, dans les pays qui ont vécu ces événements) peuvent entraîner des décennies plus tard une baisse ou une hausse passagère de ce pourcentage. A cela est venu s'ajouter, depuis une cinquantaine d'années, un troisième facteur : la baisse de la mortalité *au-delà de 60 ans*, qui induit un « vieillissement par le haut » de la pyramide des âges. Dans les pays les plus avancés, le gain d'espérance de vie dû à cette évolution est de l'ordre d'un an tous les quatre ans. Au final, la part des personnes de 60 ans et plus passera de 11 % actuellement à 22 % en 2050 en moyenne mondiale, et de 22 à 34 % en Europe.

L'augmentation continue du nombre des hommes entraîne aussi des tensions sur la *disponibilité des ressources alimentaires et naturelles*. Pour les ressources alimentaires, les progrès techniques des dernières décennies, en particulier ceux de la « révolution verte », ont permis de faire face à l'accroissement de la population. Les projections des principaux organismes internationaux concluent à la possibilité de nourrir 9 milliards d'hommes, malgré une réduction du rythme de croissance des rendements, à condition que les modes de consommation actuels des pays les plus avancés ne soient pas copiés par le reste du monde. Ces projections ne prévoient cependant pas encore une élimination totale de la sous-alimentation ou des malnutritions à l'horizon 2050.

Au total, les progrès de la science ont largement accompagné la croissance démographique, d'abord en la favorisant (par la lutte contre la mortalité, dont les effets se poursuivent), puis en la contenant (par la mise au point de méthodes contraceptives). Le défi majeur pour les prochaines décennies sera de nourrir convenablement une population mondiale encore plus nombreuse, et de lui assurer suffisamment de ressources naturelles. Cela ne sera possible qu'au prix de comportements plus « responsables » permettant de réduire les gaspillages dans tous les domaines, de choisir une alimentation mieux équilibrée et de diminuer la consommation d'énergie. »

IV-2 L'augmentation de la population mondiale aura pour première conséquence un déficit croissant en eau et une altération parfois importante de l'environnement. Comment va-t-on faire face à ces problèmes ?

Roland Douce (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'augmentation soutenue de la productivité agricole observée au cours du siècle dernier est imputable à l'épandage d'engrais (nitrate, phosphate, etc.), à l'utilisation de pesticides (insecticides, fongicides, herbicides), à l'irrigation, à l'hybridation sexuée intra ou interspécifique, à l'utilisation raisonnée de la génétique dans les programmes de sélection et au perfectionnement de l'outil agricole. Par exemple, l'augmentation spectaculaire de la productivité du blé ces trois dernières décennies est étroitement liée à l'utilisation de variétés à paille courte beaucoup plus résistantes à la verse. Ces variétés portent une mutation dans un gène qui

détermine la réponse à une hormone végétale responsable de l'allongement des tiges. Malheureusement, certaines pratiques agricoles sont une source de perturbations pour l'environnement car elles entraînent : a) une fragmentation des écosystèmes avec pour conséquence la régression profonde de la diversité des espèces (microorganismes du sol, végétaux, animaux), b) la contamination des eaux et des sols par les intrants (pesticides, nitrates, etc..) et enfin c) la baisse souvent spectaculaire du niveau de certaines nappes phréatiques liée à un arrosage abusif. Partout, y compris en Europe, l'utilisation de l'eau des nappes phréatiques s'accroît alors que leur capacité de renouvellement du fait du réchauffement climatique va décroître. La terre reçoit annuellement environ 110.000 km³ d'eau dont 40.000 km³ alimentent nos rivières et les réseaux souterrains, le reste s'évaporant. L'agriculture mondiale exige chaque année près de 8000 km³ d'eau dont 80% sont apportés par la pluie et 20% par l'irrigation. La majorité de l'eau pompée par les plantes est rejetée dans l'atmosphère par évapotranspiration qui s'effectue au niveau des feuilles. Ainsi, par exemple, 1 hectare de maïs vaporise dans l'atmosphère près de 60 m³ d'eau par jour. A cause de cette évaporation intense les plantes contrôlent en partie le climat en amortissant les écarts de température et l'hygrométrie de l'air. Elles se comportent par conséquent comme des climatiseurs naturels d'une incroyable efficacité. En fait on peut dire que le rendement d'une récolte est en gros proportionnel à l'intensité de la transpiration. C'est la raison pour laquelle la production d'un kilogramme de grains exige en moyenne des quantités très importantes d'eau : entre 500 et 4000 litres d'eau. Il est clair que la pluie apporte en théorie suffisamment d'eau pour la production de nourriture mais le gros problème c'est qu'il ne pleut pas assez au bon endroit et à la bonne période. Déjà la raréfaction de l'eau se fait cruellement sentir dans certaines régions du globe et notamment celles qui bordent l'Indus en Asie du Sud, le Colorado aux Etats-Unis, le fleuve jaune en Chine. La disparition rapide de la mer d'Aral aux confins du Kazakhstan et de l'Ouzbékistan est directement liée à l'irrigation abusive des champs de coton. L'humanité sera confrontée à l'avenir à des sécheresses plus fréquentes et l'eau sera un facteur limitant au développement de l'agriculture. De toute évidence, l'implantation et le choix des cultures devraient se faire en fonction des quantités d'eau disponibles. Des moyens devront être trouvés pour augmenter considérablement la quantité de nourriture par litre d'eau consommé.

L'agriculture mondiale devra évoluer pour répondre à de nombreux problèmes émergents ainsi qu'aux exigences légitimes de la Société. Elle sera confrontée tout d'abord à l'augmentation prévisible de la population qui devrait poursuivre sa forte croissance démographique jusqu'en 2075 avec un maximum historique à 9,2 milliards d'habitants contre 6,4 à l'heure actuelle. Les nouvelles avancées biotechnologiques devraient aider à résoudre, dans les prochaines décennies, le critique problème de l'alimentation pour plusieurs milliards d'habitants supplémentaires. Il s'agit là d'un véritable défi face à la raréfaction des énergies fossiles, à la stagnation de la productivité agricole mondiale observée au cours de ces dernières années et à la réduction inexorable des terres arables au profit de l'urbanisation. Ensuite, l'agriculture sera contrainte, sous la pression légitime de l'opinion publique, à tenir de plus en plus compte de la sauvegarde de l'environnement. Pour cela, elle devra impérativement limiter l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires, ne plus gaspiller l'eau des rivières et des nappes phréatiques et maintenir des espaces pour le maintien de la biodiversité, espaces aussi nécessaires pour le maintien des prédateurs nuisibles aux cultures. Il s'agit là d'une occasion unique pour l'agriculteur de s'approprier un rôle majeur dans la

préservation de l'environnement en évitant le plus possible le clivage entre agrosystèmes, façonnés par l'homme et dédiés à la culture, et écosystèmes, façonnés par la nature et dédiés à la biodiversité. Les deux systèmes devront cohabiter en parfaite harmonie. Ces défis se trouvent renforcés par la demande croissante de cultures à des fins non alimentaires et dédiées essentiellement à la fabrication des biocarburants (huiles, éthanol et ses successeurs). Selon l'agence internationale de l'énergie la production de biocarburants devrait au minimum quintupler d'ici à 2030 ! Ces dernières cultures qui utilisent des terres nouvellement défrichées et entraînent une surconsommation d'intrants rentreront en compétition frontale avec les cultures vivrières et risquent très rapidement de soulever des problèmes d'ordre sociologique et environnemental. Il est donc nécessaire d'évaluer finement l'intérêt des biocarburants sous l'angle énergétique, environnemental et sociologique. La réponse à tous ces défis passe d'abord par nos propres actions et aussi par des accords économiques. »

Henri Léridon (Correspondant de l'Académie des sciences) et Ghislain de Marsily (Membre de l'Académie des sciences) :

« A l'heure actuelle, environ 96 % de l'eau consommée par l'homme sert à sa nourriture, si l'on ajoute à l'eau d'irrigation l'eau de pluie utilisée naturellement par l'agriculture non irriguée. Le problème de l'eau est donc essentiellement un problème de nourriture.

Le nombre d'habitants de la Planète en 2009 est de l'ordre de 6,8 milliards. Le taux de croissance de la population mondiale est passé par un maximum (2 % par an) en 1969 environ, et depuis ne cesse de diminuer, il est actuellement de 1,2 %, et devrait passer à 0,3 % en 2050. La baisse de la fécondité est déjà bien avancée : le nombre moyen d'enfants par femme est tombé de 5 à 2,6, alors que le « niveau de remplacement des générations » est de 2,2 ; ce chiffre pourrait être atteint en 2030. La population mondiale dépassera probablement 9 milliards d'individus en 2050, et pourrait se stabiliser ou décroître avant la fin du siècle.

Comment nourrir cette population en 2050, en éradiquant du même coup la sous-nutrition qui a frappé, en 2008, environ 1 milliard d'habitants ? Ce chiffre des mal-nourris diminuait chaque année depuis les années 1960, du fait de l'augmentation plus lente de la population (de 3 à 6 milliards d'habitants entre 1961 et 2000, soit un facteur multiplicateur de 2) que celle de la production alimentaire (multipliée par 2,5 dans le même temps), et était de l'ordre de 850 millions en 2005 ; mais elle s'est mise à augmenter de façon très rapide avec la « crise des prix alimentaires » en 2006-2008, mettant en évidence la précarité des conditions actuelles. En tenant également compte de l'âge de la population à nourrir et de la progressive modification des habitudes alimentaires (augmentation mondiale de la consommation de viande), les nutritionnistes estiment que la production agricole devrait environ doubler entre 2000 et 2050 pour satisfaire la demande. Mais une croissance plus faible serait possible si une répartition plus équitable de la nourriture était faite entre tous les habitants (la consommation individuelle moyenne, exprimée en kilocalories par jour et par habitant, varie en 2003 entre 2400 pour l'Afrique Subsaharienne et 4000 pour les pays de l'OCDE, et l'excès de calories engendre l'obésité), et également si la consommation individuelle de viande était diminuée dans les pays développés ; enfin si le gaspillage de la nourriture était réduit (il atteint de l'ordre de 30% dans les pays développés, la nourriture étant jetée, et à peu près autant dans

les pays en développement, la nourriture étant mal conservée ou consommée par des prédateurs).

La production alimentaire actuelle provient à 40 % des terres irriguées (264 millions d'hectares en 2000) et à 60 % de l'agriculture dite « pluviale » où l'eau est apportée seulement par la pluie (1 300 millions d'hectares en 2000). Les tendances actuelles indiquent que le doublement éventuel de la production viendra en majorité de l'augmentation des surfaces cultivées en pluvial, là où c'est possible, c'est-à-dire par défrichement de terres cultivables actuellement en prairie-savane ou en forêt ; également par augmentation des rendements par amélioration des espèces cultivées, par de meilleures pratiques agricoles et utilisation d'intrants (engrais, produits phytosanitaires) ; et en dernier lieu par augmentation des surfaces irriguées. Le taux mondial de construction de barrages et de périmètres irrigués nouveaux est en effet passé par un maximum en 1975 (800 barrages par an) puis est actuellement retombé à 20 barrages par an, du fait d'une forte opposition à ce genre d'aménagements, particulièrement dans les pays développés, si bien que la croissance actuelle des surfaces irriguées n'est que de 1,34 million d'hectares par an.

L'augmentation des surfaces cultivées se fera aux dépens des espaces naturels (ainsi d'ailleurs que la construction des barrages) et demandera qu'un soin vigilant soit apporté à la protection de ces milieux naturels et de la biodiversité. Toute mise en culture de terres supplémentaires pour produire des biocarburants irait dans le sens d'une augmentation de ce danger. Enfin tous les continents ne sont pas également dotés d'espaces naturels susceptibles d'être mis en culture : l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient n'en ont presque plus, l'Asie en est très pauvre, les pays de l'OCDE en ont un peu, et l'Amérique du Sud et l'Afrique Subsaharienne en ont encore beaucoup. Il est donc fortement probable qu'en 2050, certains pays ou même continents ne seront plus en mesure d'assurer leur autosuffisance alimentaire, et contraints d'importer de la nourriture, comme c'est déjà le cas aujourd'hui en Afrique du Nord et au Moyen Orient.

Par ailleurs, les changements climatiques vont globalement augmenter la ressource en eau (augmentation moyenne des précipitations mondiales), mais en revanche en modifier la répartition géographique : il pleuvra en moyenne moins sous les latitudes méditerranéennes, c'est-à-dire dans les zones qui sont déjà aujourd'hui en situation de déficit structurel (sud de l'Europe, Afrique du Nord, pour ce qui est proche de nous, mais aussi dans toute la bande correspondante sur les deux hémisphères). Il pleuvra plus dans les zones septentrionales (Europe du Nord, Sibérie, Amérique du Nord) et également dans les zones proches de l'équateur. A ces modifications de la quantité d'eau reçue vont se superposer des changements dans leur répartition saisonnière, ainsi que dans la fréquence et l'intensité des épisodes pluvieux, qui devraient se traduire globalement par une diminution de l'eau stockée dans le sol. Cependant, globalement, si l'on estime à environ 110 millions d'hectares les surfaces mondiales qui seront perdues pour l'agriculture pluviale du fait de ces changements, le réchauffement devrait permettre de mettre en culture environ 160 millions d'hectares dans les régions septentrionales.

En définitive, ce n'est pas vraiment l'eau qui sera le facteur limitant de la production agricole (sauf pour les pays méditerranéens qui souhaiteraient garder demain une certaine forme d'indépendance alimentaire), mais plutôt la disponibilité globale en sols, et la dégradation éventuelle des sols par salinisation, érosion ou appauvrissement en matière organique et sels minéraux, si les modes de culture ne sont pas strictement adaptés à la nature des sols.

En revanche, en années très anormalement sèches, si cette sécheresse frappe du même coup plusieurs continents, comme cela s'est déjà produit dans le passé (par exemple au XIX^e siècle), il ne peut être exclu que des déficits alimentaires importants puissent se produire, pouvant conduire à de véritables famines, car les stocks mondiaux de nourriture n'ont jamais été aussi bas : ils représentent en céréales moins de deux mois de la consommation mondiale, mais un peu plus en têtes de bétail.

Le problème de l'accès à l'eau potable de la population mondiale est un autre grand défi de l'humanité : actuellement, plus d'un milliard d'êtres humains n'y ont pas accès, et plus de deux milliards n'ont pas de systèmes d'assainissement. Ce n'est en général pas un manque d'eau, mais un manque d'équipement en moyens de traitement pour la rendre potable, et en conduites pour la transporter et la distribuer, puis collecter et retraiter les eaux usées. Le problème n'est pas technique (les moyens de le faire sont connus et disponibles) mais financier : il faudrait dépenser chaque année environ 20 milliards de dollars pour équiper les pays pauvres, afin de seulement réduire d'un facteur deux le nombre d'êtres humains sans accès à l'eau potable et l'assainissement, d'ici 2015 (objectifs dits du millénaire). Or on dépense actuellement environ la moitié de cette somme. En cas de pénurie de la ressource, on peut faire appel au dessalement de l'eau, mais à des coûts énergétiques (2 à 4 kilowatt.heure, kWh/m³) et économiques (0,7 € par m³) relativement élevés. Ces coûts sont accessibles aux pays développés, mais cependant bien trop chers pour fabriquer de l'eau pour l'agriculture (à de rares exceptions près, comme certains produits maraîchers de haute valeur).

Enfin pour l'eau industrielle, les grands besoins sont pour le refroidissement des centrales thermiques, mais on sait utiliser des solutions alternatives (aéro-réfrigérants, eau de mer). Les industries grandes consommatrices d'eau ont su, en cas de pénurie, réduire la consommation (recyclage...) ou s'installer dans des pays où l'eau ne manque pas. »

IV-3 En France, y aura-t-il un déficit en eau dans les deux décennies à venir et, si oui, comment résoudra-t-on ce problème, différent de région en région ? Quelles seront les conséquences pour l'industrie agroalimentaire de la France ?

Ghislain de Marsily (Membre de l'Académie des sciences) avec Bernard Itier (chercheur à l'INRA) et Bernard Seguin (chercheur à l'INRA) :

« En France, la majorité de l'agriculture est actuellement de type pluvial, c'est-à-dire non irriguée. La superficie irriguée en France est passée de 450 000 hectares en 1955 à 1,5 millions d'hectares en 1990 (sur une surface agricole utile totale (cultivable) de 27,6 millions d'hectares) et elle est à peu près constante depuis. Les 1,5 millions d'hectares irrigués sont, en 2000, à 50 % du maïs, 11 % du maraîchage et des cultures sous serre, 7 % des vergers, 7 % du fourrage et le reste distribué sur pommes de terre, blé, autres céréales, tournesol, soja, protéagineux, prairies. Les

prélèvements totaux d'eau d'irrigation en 2001-2002 étaient de 4,9 milliards de m³, contre 6,3 pour l'eau domestique, 3,8 pour l'eau industrielle, et 19 pour la production d'énergie (hydro-électricité et refroidissement des centrales thermiques). Il faut souligner cependant que les prélèvements agricoles, à la différence des prélèvements industriels ou domestiques, ne sont pas restitués au milieu après usage, puisque, si l'irrigation est correctement gérée, l'eau d'irrigation est envoyée à l'atmosphère. Ceci conduit à une importante différence entre eau prélevée au milieu et eau dite consommée (prélèvements moins rejets après usage) où le pourcentage de consommation de l'agriculture grimpe jusqu'à près de 70 %, contre 11 à 15 % pour l'eau domestique et industrielle.

Les grands bassins hydrographiques où se pratique l'irrigation sont Rhône-Méditerranée-Corse (39 % des prélèvements), Adour-Garonne (31 %), Loire-Bretagne (24 %), le reste, soit 6 %, se partageant entre Seine-Normandie, Artois-Picardie et Rhin-Meuse. Dans le Sud-Est de la France, la région bénéficie pour ses ressources en eau de la présence des Alpes, d'abord avec le barrage de Serre-Ponçon, qui est le plus grand lac artificiel d'Europe (28,2 km²) et le deuxième en volume (1,27 km³). Il produit de l'électricité, et, grâce à la construction du Canal de Provence, alimente en eau la majeure partie de la Provence. La région bénéficie aussi directement du Rhône, le deuxième grand fleuve français, dont le débit d'étiage en été à Beaucaire est très important, de l'ordre de 600 m³ par seconde. Le Rhône est utilisé pour l'irrigation du Languedoc (par le Canal Philippe Lamour géré par la Compagnie du Bas-Rhône-Languedoc) dont la capacité est très sous-utilisée. Les ressources en eau sont donc abondantes, car les Alpes reçoivent et recevront toujours dans le futur beaucoup d'eau, en partie stockée sous forme de neige et glaces, ce qui explique les forts débits disponibles en été. Dans le Sud-Ouest, les Pyrénées sont aussi un château d'eau, équipé de nombreux barrages, mais en revanche elles ne sont pas assez hautes pour retenir suffisamment de neige et de glaces, donc le débit d'été y est beaucoup plus faible.

Les changements climatiques devraient réduire globalement les précipitations dans notre pays, particulièrement en été et d'abord dans le Sud dans un avenir proche (2020-2050), puis sur l'ensemble de la façade Ouest du pays (et plus particulièrement le Sud-Ouest) dans un avenir plus lointain (2070-2100). Pour la France du Sud-Est, nous pouvons penser que les équipements existants ou éventuellement à construire permettront de compenser les déficits. Pour la France du Sud-Ouest, la ressource en eau sera moins assurée, il sera peut-être nécessaire d'y construire de nouveaux barrages ou retenues collinaires pour tenter de conserver une certaine irrigation, mais la ressource pourra manquer. Il en ira de même pour la France de l'Ouest et peut-être même du Nord (où la réduction des précipitations est moins certaine, mais néanmoins possible), les ressources en eau seront moins assurées. Pour ces trois régions, il est probable que la réduction de la ressource conduise à devoir privilégier les cultures moins consommatrices d'eau quand celle-ci est rare, comme les céréales d'hiver par opposition aux cultures d'été, ou, pour les cultures d'été, comme le sorgho par exemple qui consomme moins que le maïs. Cependant la France, qui est actuellement un grand pays exportateur de céréales, mais importateur de fruits et légumes, devrait malgré les changements climatiques rester pour l'essentiel autosuffisante en produits alimentaires, et être capable de maintenir une industrie agroalimentaire active, quitte à modifier un peu ses productions.

Pour ses besoins en eau non agricoles, la France pourrait connaître dans le futur des déficits en eau pour le refroidissement de ses centrales thermiques, en été pendant

les années de canicules. Il pourrait être alors nécessaire d'orienter ce refroidissement vers les aéro-réfrigérants, moins consommateurs en eau, ou de privilégier la construction des centrales nouvelles sur le littoral, utilisant l'eau de mer. Les besoins en eau domestique et industrielle ne devraient jamais poser de gros problèmes, ces eaux pouvant être transportées à distance, recyclées, ou même, pour les grandes villes côtières, obtenues par dessalement. En cas d'années sèches, les économies d'eau permettent de réduire la consommation. »

IV-4 Que peut-on dire des conséquences sur la santé des divers problèmes liés au changement climatique ?

Bernard Meunier (Membre de l'Académie des sciences) :

« **Le changement climatique a-t-il une influence sur le développement des maladies infectieuses ?** Le développement des maladies infectieuses et la dissémination des pathogènes responsables de ces maladies sont influencés par de très nombreux paramètres de nature extrêmement différente. Les changements climatiques sont un de ces éléments parmi d'autres.

Il nous faut donc examiner la liste des paramètres principaux sans essayer de les classer par ordre d'importance dans un premier temps (cette liste n'est pas exhaustive) et nous limiterons cette présentation à trois catégories de pathogènes : les virus, les bactéries et les parasites.

Influence des changements de température sur les pathogènes.

- Les virus se développent plus facilement à basse température, ce qui explique la prépondérance des infections virales de type grippal en hiver (les virus de la grippe sont des virus aériens qui sont souvent transportés par des particules humides). Le déplacement des virus aviaires est en partie lié à l'évolution des migrations d'oiseaux qui est influencée par les modifications climatiques dont la température est un élément. Par ailleurs, face à une infection virale, n'oublions pas que l'organisme humain se défend en augmentant sa température.
- Une augmentation de la température ambiante favorise la prolifération bactérienne. Celle-ci est évitée en mettant en place une chaîne du froid dans la transformation et le transport de nourriture afin de garder au plus bas niveau possible les populations bactériennes exogènes dans notre alimentation. Dans les pays chauds, en l'absence de traitements adaptés, les eaux de surface sont souvent des bouillons de culture et l'utilisation d'agents de désinfection puissants est essentielle pour assurer une eau potable.
- La propagation de nombreuses maladies parasitaires se fait par l'intermédiaire de moustiques (anophèles dans le cas du paludisme). Dans les zones tropicales, les larves des moustiques se développent très bien dans des eaux chaudes et stagnantes.
- Une élévation de la température favorise le développement de parasites et de champignons lors du stockage des céréales et légumineuses (ce sont des graines vivantes) dans des sites non réfrigérés.

Mise à part la catégorie des virus aériens comme celui de la grippe, une élévation de la température favorise la prolifération des agents pathogènes. Toutefois, notons qu'un refroidissement du climat aurait des conséquences importantes sur la diminution des récoltes comme cela a été le cas au XVIII^e siècle, engendrant des pénuries alimentaires. Dans les faits, la propagation des maladies et des pandémies infectieuses est largement sous contrôle de paramètres plus importants résumés ci-dessous.

Autres facteurs ayant une forte influence sur le développement des maladies infectieuses.

- Le développement du SIDA au début des années 1980 est celui d'une maladie sexuellement transmissible et ce paramètre est le seul responsable de l'expansion de cette pandémie, en l'absence d'un vaccin efficace ou de chimiothérapies capables d'éradiquer ce rétrovirus chez l'homme.
- Les infections bactériennes se développent d'autant mieux que les règles d'hygiène pasteurienne sont moins bien respectées. Depuis les alertes lancées par les autorités de santé à propos de la grippe A de type H1N1, il est remarquable d'entendre à nouveau les médias recommander le lavage des mains au savon, d'éviter de tousser sans mettre un mouchoir devant son visage. Encore un effort et il sera demandé de ne pas cracher dans les lieux publics. Seuls les plus anciens se souviennent que la lutte contre la prolifération de la tuberculose est passée par un respect strict de l'hygiène pasteurienne. Un seul bacille de *Mycobacterium tuberculosis* venant d'un crachat en dessiccation est suffisant pour contaminer une personne par simple inhalation.
- Un autre facteur important est la densification de la population humaine dans les grandes métropoles dont la taille est en croissance forte depuis le passage de la population mondiale de 1 à plus de 6 milliards entre 1900 et 2000. Il n'est pas rare de revoir des épidémies de choléra dans de grandes mégalo-poles situées dans des zones chaudes de la planète et dont le traitement des eaux usées est partiel ou inefficace. Plus de 80% des eaux usées ne sont pas traitées dans les pays en voie de développement. La réduction de la qualité de l'eau dans de très nombreux pays, amplifiée par l'augmentation des populations urbaines est un problème de santé majeur.
- Dans les pays développés, le mauvais entretien des moyens de climatisation est parfois à l'origine de nouvelles pathologies infectieuses. C'est le cas de la légionellose observée pour la première fois chez des anciens combattants américains lors d'une réunion dans un hôtel dont les filtres du système de climatisation ne retenaient pas les bactéries responsables. Cette même bactérie prolifère également lors du stockage de l'eau chaude domestique stagnante à des températures de l'ordre de 35 °C.
- L'augmentation des échanges de produits et des voyages contribue de manière très significative à la diffusion des agents pathogènes. Le suivi de la dernière pandémie grippale a permis de confirmer que les voyages aériens représentent un des facteurs importants de la propagation des virus.

Actuellement, il est raisonnable de penser que le développement des maladies infectieuses sera plus fortement lié à l'augmentation de la population mondiale, aux volumes des échanges et à la dégradation de la qualité de l'eau en général, qu'aux changements climatiques au cours des 30 à 40 prochaines années. »

Maxime Schwartz (Correspondant de l'Académie des sciences) :

"Changement climatique et maladies infectieuses : L'émergence récente de la pandémie de grippe à virus A-H1N1 et, plus généralement, celle de nombreuses maladies infectieuses humaines au cours de ces quelque 30 dernières années, ont conduit certains à se demander si ces phénomènes pourraient avoir résulté, au moins en partie, du changement climatique. Si tel était le cas, les phénomènes d'émergence pourraient se multiplier dans l'avenir.

Dans les cas récents d'émergence, le rôle du changement climatique a sans doute été nul ou marginal.

Ainsi, il est clair que l'émergence du SIDA, au début des années 1980, résultant de la transmission de virus du singe à l'homme dans la brousse africaine, puis de sa dissémination dans la population humaine, d'abord en milieu urbain en Afrique, puis dans le reste du monde du fait du développement des voyages, fut totalement indépendante du changement climatique. On peut en dire autant de l'épidémie de « maladie de la vache folle » en Grande-Bretagne, avec sa transmission à l'homme sous forme de maladie de Creutzfeldt-Jakob : celle-ci a résulté de changements dans les pratiques d'alimentation des bovins.

Il en est de même pour la pandémie actuelle de grippe à virus A-H1N1. En effet, les grandes pandémies grippales, qui reviennent périodiquement et dont la plus connue fut l'épidémie de grippe dite « espagnole » en 1918-1919, résultent d'un phénomène indépendant du changement climatique. Il s'agit de l'adaptation à l'homme de virus grippaux d'origine animale, le plus souvent aviaire, ou de virus hybrides résultant du ré-assortiment entre des gènes de virus animaux et humains. Si ces virus causent des pandémies, c'est que leurs protéines de surface, l'hémagglutinine (H) et la neuraminidase (N), sont celles de virus animaux qui n'ont jamais été vus par le système immunitaire des populations humaines et qu'ils se propagent donc très efficacement.

Avant de tenter d'évaluer l'impact possible du changement climatique sur les maladies infectieuses dans le futur, citons le cas d'une maladie dont l'émergence a été indépendante de ce changement...mais dont la diffusion pourrait s'accroître du fait de l'augmentation de température dans certaines régions. Il s'agit de la légionellose. On sait que l'émergence de cette maladie, reconnue en 1976, a résulté du fait que la *Legionella*, bactérie commune des étendues d'eau, a trouvé un nouvel habitat dans l'eau résiduelle des tours de conditionnement d'air. Diffusée en même temps que l'air conditionné elle peut ainsi accéder aux poumons et causer de graves pneumonies. Même si l'air conditionné n'a pas été inventé en raison du changement climatique, insensible à l'époque, son développement éventuel, du fait d'un réchauffement du climat, pourrait accroître la prévalence de la maladie. Cet exemple, même s'il est anecdotique car l'impact de la légionellose en santé publique est malgré tout limité, illustre les effets indirects et pas toujours prévisibles que pourrait

avoir le changement climatique sur des maladies infectieuses. Mais que peut-on dire de ce sujet sur un plan plus général ?

En fait, la difficulté est grande de faire des prévisions dans ce domaine. Cela tient à plusieurs raisons dont trois sont particulièrement importantes : l'incertitude des prévisions climatiques, notre méconnaissance du fonctionnement des écosystèmes et des modalités de leur adaptation et l'impossibilité d'une expérimentation en vraie grandeur.

Le changement climatique aura nécessairement des conséquences sur nos modes de vie. Seront affectés le fonctionnement des écosystèmes, les ressources en eau et la gestion des eaux de surface, l'agriculture et l'élevage, et donc les ressources alimentaires. Nous devons changer notre habitat, et nos habitudes de consommation d'énergie. La répartition de la population sera modifiée et des « réfugiés climatiques » devront être accueillis. De tout cela résulteront des effets sur la santé et plus spécifiquement sur les maladies infectieuses, mais d'une manière difficile à prévoir aujourd'hui.

En théorie, les effets du changement global de climat concerneront les différents éléments d'un système épidémiologique. En premier lieu, les agents infectieux eux-mêmes, avec une sélection possible de populations mieux adaptées, éventuellement une modification de leur pouvoir infectieux ou de leur virulence : à cet égard, même dans un cas comme celui de la grippe, évoqué précédemment, il n'est pas impossible qu'un changement climatique affecte la stabilité du virus, et donc sa transmissibilité. En second lieu, seront concernés les vertébrés susceptibles d'être infectés et dont pourraient varier l'abondance, la distribution, la physiologie, le comportement, la dynamique des migrations ou la structure génétique des populations, cela aussi bien pour les animaux domestiques que les animaux sauvages et les populations humaines : pensons, par exemple, aux changements souvent évoqués dans les dates de migration d'oiseaux, qui transportent des virus comme les virus grippaux, ou bien à la migration des « réfugiés climatiques » qui peut s'accompagner soit du transport d'agents infectieux dans des régions où ils sont inconnus ou rares, soit de l'infection des populations migrantes par des microbes inconnus dans leur région d'origine. Enfin, seront concernés les éventuels vecteurs responsables de la transmission et qui pourraient être soumis aux mêmes types de variation : d'ores et déjà, il semblerait que la remontée vers le nord des leishmanioses canines, notamment en Italie du Nord, l'arrivée inattendue de la fièvre catarrhale ovine, en 2003-2004, en Europe méditerranéenne, ou l'apparente extension vers le nord de l'encéphalite à tiques en Suède soient en relation avec un réchauffement du climat dans ces régions, favorable au développement des vecteurs de ces maladies.

Cela dit, même si le changement climatique aura vraisemblablement des conséquences sur la distribution des maladies infectieuses, ce ne sera pas nécessairement là où beaucoup l'attendent. Ainsi, nombreux sont ceux qui pensent qu'une maladie comme le paludisme, aujourd'hui limité aux régions tropicales où il fait des ravages (500 millions de nouveaux cas et 1 à 2 millions de morts par an), va se répandre dans les régions tempérées du globe, du fait du réchauffement climatique qui y est attendu. C'est oublier qu'autrefois, et notamment durant des périodes où le climat était nettement plus rigoureux qu'aujourd'hui, le paludisme régnait sur une grande partie de l'Europe, jusqu'à la mer Baltique. La température n'est donc pas le facteur limitant. Si le paludisme a progressivement disparu du continent, c'est à cause du développement économique et de l'élévation du niveau de vie de la population : amélioration de l'habitat, assèchement et mise en culture de

zones humides, large disponibilité de quinine et automédication en cas de fièvre quelle qu'en soit la cause, etc. Le paludisme est davantage une maladie de la pauvreté qu'une maladie spécifiquement tropicale. Quelle que soit l'évolution du climat, une réinstallation du paludisme dans les pays développés paraît aujourd'hui d'autant plus improbable que, si jamais elle s'amorçait, elle serait aussitôt détectée et les moyens d'éliminer les foyers de transmission seraient rapidement mobilisés. En conclusion, le changement climatique aura nécessairement des effets sur la santé. Certains pourront être très directs : on se souvient des effets de la canicule durant l'été 2003. D'autres seront plus indirects, dont ceux évoqués plus haut. De nombreuses organisations et institutions, l'OMS par exemple, tentent de prévoir ces effets pour que nous puissions nous préparer à les affronter. Mais la prévision dans ce domaine reste des plus aléatoires."

Alain-Jacques Valleron (Membre de l'Académie des sciences) :

« **Changement climatique et santé** : La conséquence la plus inquiétante du changement climatique prévu concerne les événements extrêmes (canicules, ouragans, typhons), dont on prédit que la fréquence augmentera : les catastrophes sanitaires qu'ils causent déjà dans les circonstances actuelles sont énormes: ces événements climatiques extrêmes semblent en effet avoir tué entre 1972 et 1996 environ 120 000 personnes par an et on a évalué que le nombre d'individus affectés, soit physiquement soit dans leur vie courante, était peut être mille fois plus important. En 1999, un seul cyclone a fait en Inde plus de 10 000 morts et des millions de sinistrés (à Orissa). Il est à craindre que le changement climatique augmente encore cette charge sanitaire. De plus, les conséquences des événements extrêmes toucheront en priorité les pays à forte démographie et ayant des infrastructures de santé publique pauvres. Le changement climatique pourra avoir des effets indirects similaires sur la santé dans les pays pauvres, par la baisse du rendement des récoltes qui a été anticipée par certains, et par l'augmentation du niveau de l'eau qui touchera des zones côtières très habitées actuellement.

L'impact direct du réchauffement climatique sur les maladies chroniques est plus difficile à estimer. Cependant, pour l'anticiper, on peut considérer les données de mortalité recueillies dans différentes villes du monde : ces données montrent que la mortalité en un lieu donné varie en fonction de la température selon une courbe en U. Ceci signifie que les mortalités les plus fortes sont observées aux basses et hautes températures, et aussi qu'il y a une température "optimale" de moindre mortalité. Cette température optimale varie selon la région : elle est plus basse, par exemple, en Europe du Nord qu'en Europe du Sud, ce qui montre les capacités d'adaptation de la population aux températures actuelles et peut donc faire espérer que les hommes s'adapteront également aux variations futures de celle-ci. Cependant, l'élévation de température peut avoir aussi des effets indirects sur la mortalité et la morbidité par maladies chroniques. En effet, l'élévation des températures s'accompagne d'augmentation de la pollution atmosphérique, notamment par l'ozone. Il est démontré que la pollution atmosphérique, qu'elle soit chronique ou en pic, est associée à une augmentation de la morbidité et de la mortalité par maladies cardio-respiratoires. Par conséquent, il est possible que, par cet autre biais, le réchauffement climatique augmente la morbidité et la mortalité par

ces affections, d'autant plus que l'urbanisation croissante attendue augmentera le nombre de personnes générant – et subissant - la pollution atmosphérique.

Les fortes mortalités liées aux très hautes températures sont bien connues avec l'exemple des 15 000 morts en France lors de la canicule de 2003, qui dans ce cas aussi ont surtout touché les personnes âgées, démunies, isolées dans les grandes villes. Les fortes mortalités liées aux basses températures sont moins commentées. Pourtant on a observé par exemple 29 000 morts supplémentaires au seul mois de janvier 1949. Des travaux de la dernière décennie ont montré que la mortalité due aux maladies cardiaques ischémiques durant les hivers froids pouvait être multipliée jusqu'à 3 chez les hommes jeunes ; d'autres travaux ont trouvé que le taux de mortalité augmentait linéairement au fur et à mesure que la température diminuait. L'augmentation générale prévue de la température devrait donc avoir comme conséquences certes plus de morts liées aux températures élevées, mais aussi moins de morts liées aux températures très basses.

En ce qui concerne les maladies infectieuses, les changements climatiques entraîneront des modifications écologiques, dont la plus souvent évoquée en relation avec la santé est l'extension du territoire des insectes vecteurs de différentes maladies (paludisme, dengue, chikungunya...). A cet égard deux remarques doivent cependant être faites: d'une part, la prévision de ces extensions est extrêmement difficile à faire car elles ne dépendent pas que de la température. Ainsi, l'élévation de la pluviosité, en détruisant des larves à des périodes critiques, peut renverser l'effet de l'augmentation de la température. D'autre part, on ne doit pas oublier que le sud de l'Europe (y compris la France) et l'Afrique du Nord étaient impaludés au siècle dernier. Le paludisme en a disparu. Le retour, le maintien, ou la disparition, du paludisme et des autres maladies vectorielles sont donc sans doute beaucoup plus liés aux moyens mis en œuvre par l'homme (infrastructures de santé publique et lutte anti-vectorielle) qu'aux variations de la température.

Les modifications écologiques liées au climat peuvent aussi avoir des conséquences sur d'autres maladies. Ainsi, on a montré que la survenue de certaines épidémies de choléra, pour lequel le plus de travaux ont été menés, mais aussi de la fièvre de la vallée du Rift et des pneumonies par Hantavirus avait été corrélée à El Niño. La corrélation entre épidémies de choléra et épisodes El Niño a été trouvée en Asie, en Afrique, et plus tard en Amérique du Sud. Il a ainsi été montré que la survenue des épidémies de choléra au Bangladesh durant la période 1980-1998 avait suivi les épisodes El Niño avec un décalage de 11 mois. Cette corrélation est vraisemblablement causale; durant un épisode El Niño, la température de la surface de l'eau de mer, dans laquelle se déversent l'eau et les nutriments venus de terre, peut augmenter jusqu'à 3°C ; des bouffées zooplanctoniques (qui ont été confirmées par observation satellitaire) surviennent alors et libèreraient le *vibrio cholera* qui y est massivement répandu. Ceci est un exemple frappant d'un phénomène climatique mondial ayant déjà un impact épidémiologique très vraisemblable. Il est raisonnable de penser que le changement climatique prédit amplifiera de tels phénomènes.

Il y a aussi des mécanismes plus hypothétiques par lesquels le changement climatique pourrait avoir un impact sur la diffusion des épidémies de certaines maladies virales, notamment la grippe « saisonnière » (celle qui cause chaque année une épidémie marquée dans les pays tempérés). L'épidémiologie de la grippe saisonnière est en effet clairement différente dans les pays tempérés et dans les pays tropicaux, dans lesquels les virus grippaux circulent toute l'année, et où les pics épidémiques sont absents, ou moins affirmés, ou doubles comme cela a été observé à Hong Kong ou Taiwan. On a fait l'hypothèse que ces pays tropicaux pouvaient être

une sorte de réservoir permanent de virus grippaux, réservoir où se produiraient les glissements antigéniques qui modifient constamment le virus, et d'où partiraient les épidémies saisonnières qui touchent régulièrement, chaque année, l'Europe et l'Amérique du Nord. Un déplacement des frontières du monde tropical pourrait donc avoir un impact sur la circulation des épidémies de grippe saisonnière. Ceci est hypothétique, mais représente un exemple de plus des interactions entre climat et santé, possibles, mais imprévisibles dans le détail.

Il faut finalement remarquer que les effets de la température sur la mortalité et la morbidité, quels qu'ils soient, sont majoritairement observés chez les personnes âgées, pauvres, et précaires. Le vieillissement démographique prévu sur l'ensemble du globe concomitamment au changement climatique amplifiera sans doute les conséquences de ce dernier sur la santé, et surtout dans les pays pauvres. «

V - ENVIRONNEMENT, BIODIVERSITE

Les hommes vivent en étroite symbiose avec les écosystèmes de la nature qui sont presque tous liés entre eux. Les évolutions de ces divers écosystèmes ont toujours existé et l'accélération en cours de certaines d'entre elles est traitée ici :

V-1 Quelles sont précisément les menaces que les modifications de l'environnement font peser sur la biodiversité ? Peut-on citer des faits déjà survenus en France?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences) :

« Notre existence dépend de l'ensemble des espèces vivant sur terre et dans les mers. Toute une diversité d'espèces nous permet de nous alimenter, de nous chauffer, de nous vêtir ou de nous soigner, tout en purifiant l'air que nous respirons et l'eau que nous buvons. En même temps, ce sont des espèces vivantes, végétales ou animales, qui préviennent l'érosion des sols, atténuent les variations climatiques, assurent la pollinisation des récoltes, la dispersion des graines... En de nombreuses régions, cette biodiversité est une ressource touristique vitale. On lui reconnaît aussi une valeur culturelle, esthétique et spirituelle. D'un point de vue éthique, elle représente un héritage naturel que nous devons transmettre à notre descendance.

L'intérêt de la biodiversité commence avec nous-mêmes ou, plus précisément, avec notre flore intestinale : quelque 400 espèces de micro-organismes, atteignant des milliards de milliards d'individus – environ dix fois le nombre de nos propres cellules – capables de dégrader toute une variété de molécules telles que des pectines, des celluloses, des héli celluloses, des amidons que, sans elles, nous serions incapables d'assimiler. Cette symbiose entre des micro-organismes et nous-mêmes résulte de toute une histoire évolutive partagée qui a sélectionné des interactions essentielles pour notre santé. Ces interactions nous permettent par exemple de digérer les fruits et les légumes qui nous apportent les vitamines, les antioxydants, les fibres, dont nous ne pouvons pas nous passer. Ces fruits et ces légumes sont arrivés à maturité grâce à des apports de sels minéraux issus de la transformation de déchets d'êtres vivants par un autre ensemble d'espèces, celui de la microfaune du

sol. La simple assimilation de fruits et de légumes implique donc divers ensembles d'espèces qui, eux-mêmes, varient d'une région à l'autre. En tant qu'êtres humains, nous faisons partie de ces ensembles. Ils constituent la biodiversité de la planète.

Nous dépendons aussi largement de la biodiversité du point de vue de notre santé. Les vertus médicinales de certaines plantes sont connues depuis longtemps et une large part des molécules de notre pharmacopée actuelle a été identifiée grâce à des plantes, parfois des animaux. C'est aussi à partir d'observations et d'expériences menées sur de nombreuses espèces animales que nous comprenons mieux comment fonctionne le corps humain et les maladies qui l'atteignent. Rappelons que 75 % de la population mondiale dépendent de remèdes traditionnels d'origine naturelle, qu'en Chine, 5 000 des 30 000 espèces de plantes supérieures recensées sont utilisées à des fins thérapeutiques, et que chez nous, de nombreuses plantes communes sont bien connues à cet égard : le millepertuis comme antidépresseur, la consoude comme cicatrisant, l'arnica contre les contusions, sans oublier : l'aubépine, la sauge, le genêt, la verveine, le saule blanc, ... Le gingko a permis de découvrir des produits très efficaces contre les maladies cardio-vasculaires, l'if du Pacifique et la pervenche de Madagascar sont toutes deux utilisées dans le traitement de certains cancers, et des propriétés anti-sida ont été récemment découvertes pour un arbre de Bornéo. On ne saurait enfin oublier, célèbre entre toutes, la découverte de la pénicilline à partir de l'observation d'une culture contaminée par des champignons.

Nous dépendons tout aussi largement de la biodiversité trop souvent méconnue des sols et des eaux. Dans les sols, la production agricole est liée à une incroyable quantité d'animaux microscopiques et autres, dont les lombrics au rôle fondamental d'aération et de décomposition de la matière organique. La disparition de cette faune par tassement, remblai ou usage excessif de traitements chimiques, peut avoir des conséquences dramatiques sur la fertilité des sols. Dans les eaux douces, une biodiversité tout aussi riche et inaperçue assure des fonctions d'épuration tout aussi indispensables. La production d'eau potable est par exemple très influencée par de nombreuses espèces de micro-organismes au travail dans les stations d'épuration. En milieu naturel, une moule d'eau douce est capable de filtrer plus de sept litres d'eau chaque jour. Et diverses espèces de grenouilles, de libellules et autres invertébrés sont des indicateurs particulièrement sensibles de la qualité des eaux de nos rivières et de nos lacs.

Plus globalement, la biodiversité a permis à la vie de surmonter les épisodes de changements brutaux qui, de tout temps, ont émaillé son histoire. Cette capacité d'adaptation tient à la diversité des répertoires génétiques de chaque espèce. Protéger cette biodiversité, c'est assurer les possibilités de survie de l'ensemble des êtres vivants, dont nous-mêmes, face aux aléas climatiques et autres qui nous attendent. En ce sens, chaque extinction d'espèce correspond à une perte irréparable – celle d'une possibilité d'évolution biologique acquise au prix de milliards d'années d'adaptations à d'incessants bouleversements des conditions de vie sur notre planète. »

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences) :

« L'inquiétude du public traduit sa prise de conscience de la réalité de l'érosion de la biodiversité sous l'effet des activités humaines.

L'exemple le plus net est celui de Vertébrés : parmi les 45 000 espèces de poissons, mammifères, oiseaux, reptiles et batraciens, une espèce au moins disparaît chaque

année depuis au moins 5 siècles. Le rythme naturel d'extinction, voisin d'une espèce tous les 20 ans, la durée de vie d'une espèce étant grosso modo d'un million d'années, a donc été multiplié par au moins 20. Cette tendance ne date pas d'aujourd'hui : par exemple, les premiers habitants humains de l'Amérique du Nord ont accéléré l'extinction de toute une « mégafaune » de mammifères il y a plus de 10 000 ans déjà.

Qu'en est-il des autres animaux et des plantes ? La petite taille des insectes rend leur extinction difficile à détecter, et peu d'extinctions d'espèces ont été documentées. Plusieurs facteurs concomitants indiquent cependant une augmentation considérable du rythme d'extinction. Ainsi, en aspergeant d'insecticide des arbres, on a pu notamment montrer qu'en Amazonie, plusieurs centaines d'espèces d'insectes sont inféodées à chaque espèce d'arbre. Or, par le jeu de la déforestation, et d'une démographie qui les rend au moins aussi sensibles que les vertébrés, il est incontestable que les espèces d'arbres de la zone intertropicale sont soumises à une forte augmentation de leur taux naturel d'extinction : ils entraînent avec eux tous les organismes qui leur sont inféodés. Mais la majeure partie des espèces d'insectes, et plus généralement des « invertébrés », n'est pas encore connue de la science. Environ 2 millions d'espèces vivantes sont « décrites », c'est-à-dire ont reçu un nom scientifique (dont *Homo sapiens*, notre espèce), mais on estime que la terre est peuplée de 10 à 40 millions d'espèces. Le paradoxe est que le nombre d'espèces décrites augmente rapidement, du fait des efforts d'inventaire, alors que le nombre d'espèces réellement présentes décroît. Les capacités d'évolution, et donc l'apparition de nouvelles espèces ne pourront avoir lieu qu'à un rythme beaucoup plus lent. Même si les impacts actuels de l'homme étaient enrayés, la biosphère vivrait durablement appauvrie biologiquement, et on peut donc parler d'une crise de la biodiversité.

Dans l'effet des activités humaines sur la biodiversité, on distingue généralement trois types de causes : l'exploitation directe (chasse, pêche, déforestation...), les changements d'usage, et le changement climatique. Les changements d'usage regroupent le transport et l'introduction d'espèces exotiques, la fragmentation des habitats, l'intensification agricole, l'urbanisation, etc... Ils sont le facteur qui a actuellement le plus grand impact, ayant pris le relais de l'exploitation directe. Le changement climatique a commencé à modifier la démographie et l'aire de répartition de nombreuses espèces et va certainement interagir lourdement avec les changements d'usage. C'est de ce constat qu'émerge le besoin « d'intensification écologique » de l'agriculture, notamment dans les pays émergents, la combinaison d'une aridité croissante et d'une augmentation des populations humaines posant une équation difficile à résoudre.

Mais tous ces problèmes semblent lointains, dans l'espace et dans le temps. Qu'en est-il aujourd'hui en Europe ? Des programmes de suivis en France indiquent une forte diminution de la « biodiversité ordinaire » chez les oiseaux des terres agricoles, même si les espèces spécialisées sont plus affectées que les espèces généralistes. Des études ont montré dans plusieurs pays d'Europe une diminution marquée des insectes, notamment pollinisateurs. Ces baisses d'effectifs, sans entraîner d'extinctions d'espèces, induisent des extinctions locales, dont le rythme a augmenté considérablement, peut-être d'un facteur supérieur à 100, alors même que la fragmentation des habitats freine souvent les recolonisations.

Mais la planète a pu vivre sans les mammoths, elle pourra vivre sans les ours blancs, victimes programmées du réchauffement climatique. En quoi et comment l'érosion de la biodiversité pose-t-elle problème aux sociétés humaines ? Le premier

problème est celui de l'érosion de ressources : la surpêche de nombreuses espèces marines, au mépris des diagnostics pourtant disponibles sur les « stocks », montre bien que les implications sociales – dans ce cas pour les pêcheurs - conduisent à des fuites en avant aux conséquences très difficilement réparables, avec des effets de seuil imprévisibles, comme l'effondrement des stocks de morue. Parmi d'autres ressources, des plantes susceptibles de fournir des molécules actives disparaissent chaque jour, avant même d'être connues de la science. Le taxol, utilisé pour traiter certains cancers, n'aurait pas été découvert si l'if du Pacifique avait disparu. On parle de services rendus par les systèmes écologiques et la biodiversité. La multiplicité et le caractère diffus de ces services rend leur quantification économique difficile, mais la notion même de service y amène naturellement : le service de pollinisation assuré par les insectes a ainsi été estimé à 150 milliards d'Euros par an. Le développement durable vise à prendre en compte les conséquences des activités humaines, et, dans ce contexte, la quantification des services écologiques n'en est qu'à ses débuts. Cependant de nombreux services n'ont qu'un lien diffus avec la biodiversité : comment relier le rôle pour la qualité des eaux d'une tourbière et sa diversité végétale ? le rôle pour l'agriculture d'un sol et sa richesse en invertébrés ? Pour de telles questions, la dégradation de la biodiversité joue un rôle d'indicateur, souvent sans conséquences immédiates pourtant. On en vient à la parabole des « arracheurs de rivets » de l'entomologiste et écologue Paul Ehrlich : un passager, en montant dans un avion, aperçoit un employé qui s'active à arracher des rivets des ailes de l'avion. Il le traite de fou, mais l'employé répond que l'avion est surdimensionné, que cela va permettre des économies, et que de toute façon, il voyage dans l'avion lui aussi. Les rivets, ce sont bien sûr les espèces vivantes, et l'avion, la planète terre. Quand et comment infléchir, puis enrayer les conséquences dommageables pour les sociétés humaines de l'érosion de la biodiversité ? Quel degré d'action est nécessaire, avec quelles priorités ? Les problèmes scientifiques s'inscrivent inévitablement dans le tissu des convictions personnelles et des questions sociales et politiques. »

Yvon Le Maho (Membre de l'Académie des sciences) :

« Si le public commence à percevoir l'importance des enjeux économiques et sociaux liés au changement climatique, il est vrai qu'il ne mesure pas encore la gravité de cet autre enjeu pour notre planète et les générations futures que constitue la préservation de la biodiversité. Il faut en premier lieu prendre conscience que toute extinction est définitive et qu'il faut plusieurs centaines de milliers d'années pour qu'une nouvelle espèce émerge. L'érosion actuelle de la biodiversité n'est pas seulement la conséquence du changement climatique mais elle est directement la conséquence d'actions directes de l'homme : déforestation, disparition de surfaces agricoles, surexploitation des ressources marines, introductions d'espèces animales ou végétales perturbant les écosystèmes des milieux d'accueil... Or l'humanité dépend totalement du monde vivant pour sa propre existence, car espèces végétales et animales nous apportent des ressources fondamentales : l'air que nous respirons (production d'oxygène, piégeage du carbone, filtrage des poussières), l'eau que nous buvons (les bactéries étant indispensables à l'épuration de l'eau), notre nourriture, nos habits, nos maisons, notre santé, notre énergie et nos loisirs... Ainsi la moitié des médicaments consommés aux USA ont pour origine des molécules découvertes dans des plantes. Le développement de la monoculture associé à la réduction de la

diversité biologique nous rend par ailleurs beaucoup plus dépendants des risques de destruction massive des cultures par des ravageurs avec les graves conséquences économiques qui en découlent. Ainsi, après leur destruction à la fin du XIX^e siècle par le phylloxéra, un minuscule puceron, les vignobles français n'ont pu être reconstitués que grâce à des porte greffes issus de plants américains naturellement résistants. Par ailleurs, après surexploitation d'une ressource animale, il ne suffit pas d'arrêter l'exploitation pour retrouver la situation antérieure. Ainsi, 20 ans après l'arrêt de la pêche à la morue le long des côtes du Labrador et au large de Terre Neuve, les stocks ne se sont toujours pas reconstitués du fait du déséquilibre introduit dans les écosystèmes et le thon rouge est aujourd'hui menacé. Or, la pêche s'adresse aujourd'hui à des espèces qui vivent à de plus grandes profondeurs et à des latitudes plus élevées, espèces dont généralement l'âge de maturation est plus élevé, et sans que l'on sache toujours dans quelles conditions cette exploitation peut avoir un caractère pérenne.

Si l'on avait pu mieux mesurer les conséquences économiques d'opérations d'aménagement du territoire, nombre de celles-ci auraient certainement été abordées différemment. Ainsi, outre les ressources marines, le surcoût financier initialement élevé qu'aurait impliqué le contournement de forêts par des autoroutes, comme par exemple la forêt landaise, apparaît aujourd'hui réduit eu égard à l'impact économique direct qu'engendre la traversée directe de ces forêts sur leur résultat d'exploitation. Par conséquent, pour éviter de nouvelles erreurs préjudiciables aux générations futures, la progression de nos connaissances scientifiques sur le fonctionnement des écosystèmes et sur ses limites, ainsi qu'une meilleure perception des conséquences économiques de la réduction de la biodiversité, constituent un objectif majeur. Il faudra cependant pour cela que la recherche sur la biodiversité ne reste pas l'un des parents pauvres de nos disciplines scientifiques.

Enfin, même si cela ne fait pas sérieux au sens scientifique du terme, peut-on au-delà du côté utilitaire de la biodiversité se permettre d'évoluer vers des « printemps silencieux » ? C'est pourtant ce qu'annoncent les dernières statistiques du Muséum National d'Histoire Naturelle pour les oiseaux de France...

Pour ceux qui voudraient en savoir plus, le CSPNB (Conseil Scientifique du Patrimoine Naturel) a réalisé en 2007 et 2008 deux ouvrages sur la biodiversité. Ils montrent à travers des exemples très simples et concis à quoi sert la biodiversité, pourquoi il est important de la préserver et quelles sont les conséquences de son érosion. Ces deux ouvrages, dont le premier porte essentiellement sur les espèces et le second sur le fonctionnement des écosystèmes, sont téléchargeables sur le site du Ministère de l'Ecologie à l'adresse www.ecologie.gouv.fr/-CSPNB-.html »

Maurice Tubiana (Membre de l'Académie des sciences) :

La biodiversité et la santé

« L'influence de la biodiversité sur la santé a fait l'objet de controverses entre naturalistes, qui mettent toutes les espèces animales sur le même plan, et médecins, qui donnent priorité à la santé humaine et ne voient pas en quoi les moustiques, les poux, les mouches les tiques et autres vecteurs, le ténia, les schistosomes, les douves et autres parasites sont utiles, alors qu'ils altèrent la santé. Il est inadmissible que, dans les pays les plus déshérités plus de trois millions d'enfants meurent chaque année de paludisme et autres maladies dont les insectes sont les vecteurs ou de maladies parasitaires. Je ne vois pas non plus l'utilité pour les

hommes des serpents venimeux et autres bêtes nuisibles. Freud, en 1929, dans son essai « Malaise dans la civilisation », avait déclaré que l'effort pour les contrôler avait été une avancée fondamentale de la civilisation. Les choses ont-elles changé depuis ? L'éradication de la variole et de la poliomyélite ont été des événements heureux et j'espère qu'on maîtrisera aussi le virus du sida, et éliminera les germes de la peste et du choléra ainsi que les vecteurs qui transportent ces germes.

Certains insecticides ont été accusés d'être toxiques, il faut les passer au crible et exclure ceux qui sont suspects. Mais rappelons que le DDT a été réhabilité et est conseillé par l'OMS pour protéger les enfants et les nourrissons dans les habitations. Le métabolisme des insectes et des mammifères étant différent, il aurait été surprenant qu'on ne trouve pas de produit qui soit toxique pour les premiers et inoffensif pour les seconds et permettant, éventuellement un effet sélectif sur certaines catégories d'insectes. L'interdiction en 2004 de deux insecticides (le Gaucho et le Regent), en raison d'une rumeur faisant état d'un effet toxique sur les abeilles n'a pas amélioré la santé des abeilles, mais a nui à la réputation de la France à l'étranger en mettant en exergue l'incapacité de nos décideurs à résister à la pression de l'opinion.

Cependant, ces polémiques ne doivent pas cacher un consensus sur les points essentiels, notamment sur la nécessité de protéger les micro-organismes dans le sol afin de préserver sa fertilité. En effet, un des problèmes majeurs du XXI^e sera la pénurie alimentaire puisque la population augmente plus vite que la production vivrière. La malnutrition a des conséquences redoutables. Par exemple, en France, pendant la guerre et l'Occupation, on a constaté une forte augmentation du taux de mortalité en fonction de la ration calorique (voir les données de l'Institut National d'Hygiène publiées en 1945-46). On retrouve ces corrélations à l'échelle mondiale, or un milliard d'habitants sont sous-nutris. Il faut donc augmenter le nombre de calories disponibles (+50% d'ici 2050) et accroître les rendements afin de ne pas être obligé de trop augmenter la surface des terres arables au détriment des zones forestières où la biodiversité est importante. Les OGM offrent une voie de recherche essentielle et il faut lutter contre leur discrédit. Il faut aussi tenir compte de la qualité des calories. Dans les pays développés, nous mangeons trop de sucres rapides, ce qui favorise le diabète, trop de graisses saturées (présentes notamment dans la viande), ce qui favorise les maladies cardiovasculaires. Il faut substituer le poisson à la viande, ce qui pose le problème des ressources maritimes et de l'aquaculture. Le maintien (et même l'accroissement) des ressources en poissons sera un problème capital du XXI^e siècle.

Pour renforcer l'agriculture (irrigation, engrais), il faut de l'énergie. De plus, il faut limiter l'effet de serre. Il faut aussi ne pas laisser perdurer les inégalités et limiter par le prix l'accès à l'énergie. Il faut donc développer les sources d'énergie à bon marché et ne créant pas d'effet de serre. Le nucléaire (à condition d'utiliser les neutrons rapides) paraît incontournable puisqu'avec lui nous avons plusieurs millénaires d'énergie potentielle, même si le monde entier consommait autant d'énergie par tête d'habitant que l'Europe occidentale aujourd'hui. Ceci pose le problème technique de produire à l'échelle industrielle des réacteurs à neutrons rapides ; il faut privilégier la recherche dans ce domaine en évitant le saupoudrage (mal français par excellence). De plus, pour faire accepter le nucléaire, il faut exclure les risques de dissémination nucléaire et pour cela introduire des systèmes de

contrôle à distance des réacteurs, coupant leur production en cas de non respect des pratiques.

Pour atteindre tous ces objectifs, il est essentiel d'informer loyalement le public. Les médias le font, mais ils ont aussi d'autres objectifs, notamment trouver des lecteurs et des annonceurs afin de vivre face à la concurrence d'Internet. C'est pourquoi les scientifiques doivent assumer une partie de cette tâche et collaborer avec eux en mettant à leur disposition leurs savoirs et cette exigence de rigueur qu'ils ont tous en commun, même s'ils n'ont pas toujours les mêmes opinions. Il faut mettre fin aux désinformations sur la science, aux réticences face aux progrès techniques. Le refus des OGM, la peur des antennes de retransmission et des champs électro-magnétiques, les dérives du principe de précaution, bien illustrées par le colloque qui s'est tenu récemment à l'initiative de l'Office parlementaire des choix scientifiques et technologiques, montrent l'urgence d'une information scientifique loyale, libérée des contraintes du politiquement correct. Une chaîne de télévision consacrée à la science (y compris les sciences humaines, l'économie et l'histoire de l'art) serait un grand atout.

La mission des scientifiques est d'introduire le respect des faits et de la rationalité dans les décisions et les comportements. C'est le rejet des idées reçues et des idéologies qui a fait le prestige de la science française, du « *de omnibus dubitandum* » de Descartes au refus par Pascal de « *l'horreur du vide* » attribué à la nature, ce qui l'a conduit à découvrir la pression atmosphérique. Le prestige de Pasteur et des Curie est au moins autant lié à leur lutte contre les préjugés qu'à leurs découvertes. Soyons dignes de nos anciens. »

Liste de documents, en ligne sur le site de l'Académie des sciences, consacrés à divers aspects du changement climatique et de l'environnement

Le livret de l'environnement (2008)

http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/livret_environnement_04_08.pdf

Les rapports

- Les rapports RST

- n° 27 Cycles biogéochimiques et écosystèmes continentaux (2007)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST27.htm

- n° 26 La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ? (2007)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/liste_rapports_RST.htm

- n° 25 Les eaux continentales (2006)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST25.htm

- n° 24 La maîtrise des maladies infectieuses (2006)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST24.htm

- n° 17 Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes (2003)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST17.htm

- n° 15 Études sur l'environnement - De l'échelle du territoire à celle du continent (2003)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST15.htm

- Autres rapports

- Énergie 2007-2050 - Les choix et les pièges (2007)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/rapport_energie_07_07.pdf

- Sécurité et utilisation hostile du nucléaire civil - De la physique à la biologie (2007)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport_Dautray3.htm

- Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil (2005)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport_Dautray2.htm

- Perspectives énergétiques (2005)

- http://www.academie-sciences.fr/actualites/textes/energie_01_03_05.pdf

- L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques (2001)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport_Dautray.htm

- Pollutions localisées des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés (2000)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport44_As_fr.htm

- Conséquences scientifiques, juridiques et économiques du Protocole de Kyoto" (2000)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport45_AsAsmp.htm

- L'ozone stratosphérique (1998)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport41_As.htm

- Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion (1998)

- http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/rapport42_As_fr.htm

- Les avis du G8

- Sur le changement climatique et les transformations des technologies de l'énergie pour un avenir à bas carbone (2009)

- http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2009.htm

Déclaration commune des Académies des sciences "Adaptation au changement climatique et transition vers une société à bas carbone" (2008)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2008.htm

Déclaration commune des Académies des Sciences "Croissance et responsabilité : pérennité et efficacité de l'énergie, et protection du climat (2007)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2007.htm

Déclaration commune des Académies des Sciences : Pérennité et sécurité de l'énergie (2006)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8_2006.htm

Déclaration commune des Académies des sciences sur la réponse globale au changement climatique (2005)

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/G8.htm

- Actes de colloque

Effets de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité (2003)

http://www.academie-sciences.fr/publications/comptes_rendus/pdf/CRGeoscience_thema1.pdf

La Lettre de l'Académie des sciences

- n° 25 "Les déserts d'Arabie et d'Afrique" (2009)

http://www.academie-sciences.fr/publications/lettre/pdf/lettre_25.pdf

- n° 21 "Évolution des climats" (2007)

http://www.academie-sciences.fr/publications/lettre/pdf/lettre_21.pdf

Les colloques et séances publiques

- **Minéralogie environnementale (2009)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/pdf/colloque_14_09_09_programme.pdf

- **Les déserts d'Afrique et d'Arabie (2008)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/pdf/colloque_08_09_08_programme.pdf

- **Écosystèmes et événements climatiques extrêmes (2007)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/colloque_html/colloque_04_07_07.htm

- **Climats, cultures et sociétés aux temps préhistoriques. De l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique" (2004)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/colloques/pdf/colloque_13_09_04_programme.pdf

- **Colloque sur l'eau (2003)**

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/dossier_colloque_15_09_03.htm

- **Effets de serre, impacts et solutions. Quelle crédibilité ? (2002)**

http://www.academie-sciences.fr/actualites/communiqués/communiqués_html/dossier_colloque_16_09_02.htm

- **Les populations et leurs consommations d'énergie en 2200 : quelles perspectives ? Quels environnements ? Quelles actions à moyen et long termes ?" (2009)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/defis21_06_10_09.pdf

- **La séquestration du CO2 (2009)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/debat_19_05_09_programme.pdf

- **Diversité biologique et processus fondamentaux en écologie (2008)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/seance_interacad_17_12_08_programme.pdf

- **La combustion face aux défis de l'énergie et de l'environnement : des questions brûlantes (2008)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/html/defis21_11_03_08.htm

- **Comprendre les effets du changement climatique sur les êtres vivants : la question des mécanismes en jeu (2008)**

http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/html/defis21_15_01_08.htm

- **Climat (2007)**

- http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/html/debat_13_03_07.htm
- **Le GIEC sur l'évolution du climat (2007)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Giec_06_02_07.pdf
 - **Quelques-uns des problèmes de l'eau : adéquation besoins-ressources à l'heure des changements climatiques (2007)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/defis21_30_01_07.pdf
 - **Activité cyclonique et changement climatique (2006)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/JC_Andre_07_03_06.pdf
 - **Éruptions volcaniques, changement climatique global et évolution des espèces : des dinosaures, de leur disparition et de notre avenir sur cette planète (2006)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/html/defis21_17_01_06.htm
 - **Changement climatique - Surprises éventuelles et solutions possibles ?" (2005)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/John_Shepherd_13_12_05.pdf
 - **Étude des eaux continentales depuis l'espace (2005)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Anny_Cazenave_08_02_05.pdf
 - **Faire de la minéralogie pour l'environnement une science renouvelée pour faire face à la question du développement durable" (2003)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Annibale_Mottana_09_12_03.pdf
 - **Dôme C Antarctique : vers des enregistrements glaciaires vieux de 800.000 ans ?" (2003)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/Jouzel_Raynaud_25_02_03.pdf
 - **Les risques nucléaires (2003)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/debat_04_02_03_programme.pdf
 - **Connaissance de la de la diversité et du fonctionnement des écosystèmes forestiers comme bases de leur gestion durable (2002)**
http://www.academie-sciences.fr/conferences/seances_publicques/pdf/seance_interacad_13_11_02_programme.pdf