



DIFFUSION RESTREINTE

Micro-dossier A 99-4

CONSEQUENCES POSSIBLES, DIRECTES ET INDUITES, DE L'EFFET DE SERRE SUR LES POPULATIONS

L'accumulation dans l'atmosphère de gaz à effet de serre risque de provoquer un changement climatique au cours du XXI^e siècle (cf. micro-dossier A 99-2 : Mécanismes physiques de l'effet de serre).

Les variations probables de température et d'hygrométrie, différentes suivant les régions, l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des phénomènes extrêmes, affecteront la population humaine, directement ou indirectement. Les incertitudes sur les conséquences s'ajoutent à celles sur les prévisions climatiques.

Ce micro-dossier ne prétend pas présenter des prédictions, ni évaluer la probabilité des différents types de risques, dont on ne saurait établir un tableau exhaustif. Il présente à partir des connaissances actuelles sur les phénomènes en cause, quelques bases de réflexion au sujet des effets probables sur la production agricole, la santé humaine et les ressources en eau.

A - Compte rendu de la réunion-débat du 8 décembre 1999 organisée le Groupe X-Environnement à la Maison des X, de 18h à 20h.	pages 2 à 16
I L'agriculture face au risque climatique Exposé de M. Richard Delécolle directeur de recherche à l'INRA	pages 2 à 4
II Le réchauffement planétaire et la santé Exposé de M. Jean-Pierre Besancenot directeur de recherche au CNRS Groupement de recherche CNRS « climat et santé » Faculté de Médecine de Dijon	pages 5 à 8
III Quelques considérations sur les ressources en eau Exposé de M. Jacques Labre, X68 , Directeur délégué au développement des ressources en eau Groupe Suez - Lyonnaise des Eaux	pages 8 à 13
IV Débat Animé par M. Jean-Marc Jancovici, X81 , Ingénieur conseil - Président du groupe X-Environnement	pages 13 à 16
B - Document annexe Note complémentaire de M. Besancenot : Examen de cas récents de recrudescence du paludisme	page 17

MM. Delécolle et Besancenot ont développé certains aspects des sujets exposés en séance dans des articles publiés dans le N° spécial de mai 2000 « Effet de serre » de « La jaune et la rouge » (articles disponibles sur le site internet : <http://www.x-environnement.org>).

Les micro-dossiers d'X-Environnement sont à la disposition des membres du groupe pour leur utilisation personnelle, y compris une diffusion qui reste sous leur contrôle. Ils ne peuvent cependant ni être publiés, ni être utilisés comme référence bibliographique, et ne représentent aucune prise de position collective du groupe.

En cas de doute sur leur utilisation possible, merci de contacter le groupe à info@x-environnement.org.

A - Compte rendu de la réunion-débat du 8 décembre 1999

Conséquences possibles, directes et induites, de l'effet de serre sur les populations

Ouverture de la séance

M. Jean-Marc Jancovici X81, en ouvrant la séance, rappelle qu'elle fait suite, dans le cadre d'une série de quatre, à une réunion-débat sur les « Mécanismes physiques de l'effet de serre ». Les questions qui ont trait à la fiabilité des modèles climatiques, à l'éventualité d'un réchauffement et de phénomènes extrêmes ne sont pas à l'ordre du jour de notre réunion de ce soir. On suppose que le point d'équilibre va se déplacer avec une variation de température et de pluviométrie différente suivant les localisations et l'on se demande ce qui va se passer pour les populations. Nous avons sollicité trois personnes qui ont accepté de nous faire part de leur point de vue et de participer aux débats :

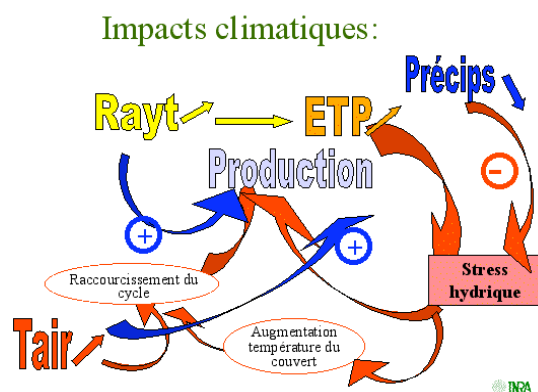
- **M. Richard Delécolle**, directeur de recherche à l'INRA, sur l'évolution de la végétation et de la production agricole ;
- **M. Jean-Pierre Besancenot**, qui dirige l'unité « Santé et climat », sur les problèmes sanitaires ;
- **M. Jacques Labre**, X68, directeur délégué au développement des ressources en eau à la Lyonnaise des Eaux, sur les conséquences géopolitiques possibles, à travers le cas des ressources en eau, car il ne paraît pas y avoir en France de personne traitant du problème global.

M. Richard Delécolle : conséquences agricoles

Il ne serait pas sérieux de prétendre pouvoir prévoir à dire d'experts les conséquences de l'effet de serre sur les écosystèmes de manière globale pour l'ensemble de la planète, tous types de végétation confondus. D'une part, les conséquences du réchauffement par zone géographique seront probablement différentes et en tous cas fort incertaines ; d'autre part, dans le fonctionnement des écosystèmes naturels, un certain nombre de mécanismes multidimensionnels entrent en jeu et ne sont pas faciles à manipuler ensemble. Je me limiterai donc à une présentation des interactions entre les végétaux cultivés et leur environnement, les réflexions correspondantes étant transposables à l'ensemble des écosystèmes.

Les modifications du climat auront deux types de conséquences, les impacts climatiques et les impacts biologiques.

Les impacts climatiques



Une augmentation de la température de l'air accélère, dans une limite de 2 ou 3 degrés, la machine photosynthétique ce qui est favorable à la production, mais elle provoque également une accélération des étapes du cycle végétatif, donc la plante dispose de moins de temps pour élaborer sa production qui va tendre à diminuer

La plante ayant besoin d'eau pour fonctionner, une diminution des précipitations va entraîner un « stress hydrique », défavorable à la production ; la diminution de transpiration qui en résulte entraîne une augmentation de la température du couvert, ce qui va contribuer au raccourcissement du cycle.

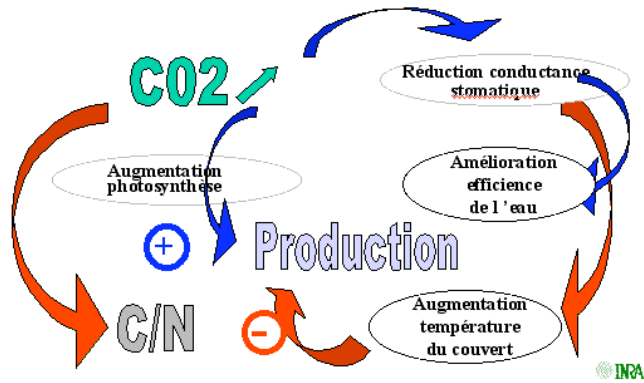
Enfin, une augmentation du rayonnement solaire a un effet positif sur la production par accélération de la photosynthèse, mais augmente l'évapotranspiration potentielle (ETP), donc le stress hydrique avec les conséquences indiquées.

Il y a évidemment des effets indirects :

- des effets mécaniques dus à l'augmentation de la vitesse du vent, de la fréquence des bourrasques, des risques de grêle etc.
- des effets sur les sols : érosion résultant d'une augmentation de la fréquence de précipitations intenses ; une accélération de la minéralisation de l'azote augmentant les pertes d'éléments solubles
- augmentation de l'ozone troposphérique d'origine agricole.

Les impacts biologiques

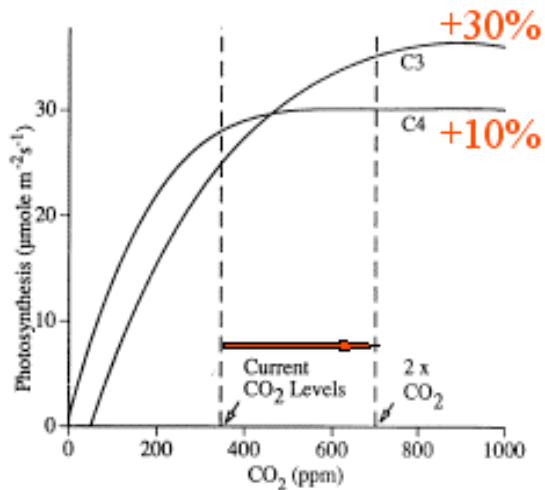
Impacts biologiques:



L'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz carbonique entraîne :

- une augmentation de la photosynthèse, donc de la production végétale ;
- une réduction de la conductance stomatique (échanges au travers des stomates) pour l'eau et pas pour le gaz carbonique d'où une amélioration de l'efficacité de l'eau qui peut contrecarrer la diminution des précipitations, mais contribue à l'augmentation de température du couvert.
- une augmentation du rapport C/N (carbone/azote) qui détermine la qualité du produit : par exemple un blé panifiable contient beaucoup de protéines, donc beaucoup d'azote. On aura donc, toutes choses égales par ailleurs, une baisse de la qualité. Il peut en résulter une aggravation des dégâts des insectes qui ont besoin d'une certaine quantité d'azote pour se nourrir, donc dévoreront une plus grande quantité de végétaux s'ils en contiennent moins.

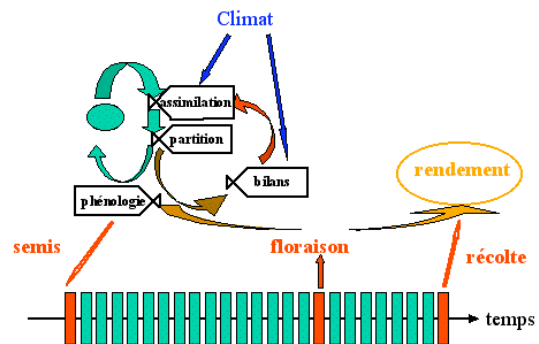
Il peut y avoir des effets indirects. Dans les plantes, il y a 2 types de métabolisme : les plantes dites en C3 (d'origine septentrionale) et les plantes en C4 (d'origine tropicale). Sous nos latitudes, la teneur actuelle en CO2 favorise les plantes en C4 adaptées à nos régions comme le maïs ou le sorgho; un doublement de la concentration est favorable à la croissance des plantes en C3, qui pour ces cultures sont des « adventices », c'est à dire des mauvaises herbes. Cette concurrence est défavorable à la production, surtout si on limite l'usage des herbicides.



Synthèse

Pour faire la synthèse, la seule solution est de recourir à des modèles de simulation des effets des facteurs climatiques sur les principales fonctions de la plante. Ces outils existent pour différentes cultures et différents types d'écosystèmes naturels. On introduit les projections de chacun des modèles climatiques par zone géographique pour obtenir une simulation, avec un pas de temps journalier, du comportement des plantes : déroulement des étapes dans le temps, production de matière sèche etc. Une analyse séquentielle permet d'obtenir une représentation de la variabilité de la réponse.

A quoi ressemblent ces modèles?



Ces modèles permettent par exemple d'estimer les effets climatiques, suivant le modèle climatique utilisé, sur la durée du cycle de culture (ci-contre : cas du maïs en région parisienne, comparaison des résultats de simulation obtenus avec les modèles du LMD et du Hadley Centre, conditions attendues en 2050, résultats présentés en histogrammes de fréquences à partir de plusieurs années observées ou simulées).

A partir de ces durées, la prise en compte de l'augmentation du CO₂ atmosphérique permet de simuler les rendements en matière sèche (ci-contre, dans les mêmes conditions que ci-dessus)

Il faut en effet distinguer les effets du déplacement des moyennes et ceux de l'augmentation de l'écart type, traduisant la plus grande variabilité du climat. Pour une distribution d'un paramètre donné, un végétal ne peut supporter plus d'une certaine valeur. Dans les schémas ci-contre, la zone hachurée représente les dégâts ; elle augmente avec l'écart type.

L'agriculture moderne des pays développés est très performante à l'intérieur d'une gamme restreinte de conditions climatiques. Elle pourrait souffrir d'une succession pluriannuelle rapprochée d'événements jusqu'ici rares, les effets de cette variabilité j'ajoutant à ceux du déplacement de la moyenne.

Dans le cas de la France, il semble que le doublement de la teneur en CO₂ entraînerait une augmentation de rendement dans la partie nord, mais des difficultés dans la zone sud, ce qui risque de poser de graves problèmes d'équipement.

Les modèles permettent de tester des stratégies d'adaptation : déplacement des zones de culture, choix des variétés pour décaler les dates de semis, modification des génotypes etc.

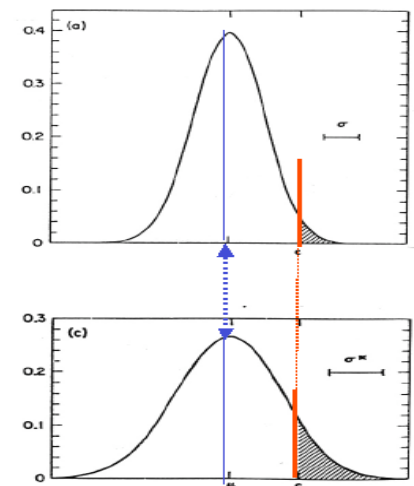
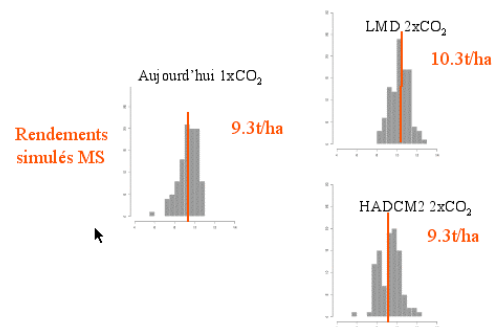
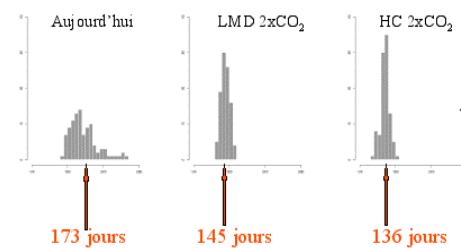
Mais on part de l'axiome d'une augmentation des moyennes ; or on peut aussi s'attendre à une plus grande variabilité des climats. Le risque de situations dangereuses augmente avec la moyenne, mais aussi avec la variabilité : la probabilité d'intervention de gelées par exemple lors de phases sensibles du cycle de végétation va augmenter, sans que l'on puisse y faire face par des modifications génétiques.

Il n'y aura probablement pas en France d'impacts très impressionnants, mais les cultures seront plus délicates et la lutte contre les ravageurs, les maladies, les adventices se heurtera à une tendance de la société d'imposer des réglementations de plus en plus sévères. Les impacts dépendront des zones de culture ; si une augmentation des productions est probable, cela coûtera très cher en eau, notamment dans les régions sud, d'où une concurrence « agriculture - société » de plus en plus féroce.

Pour la production agricole, c'est probablement la variabilité climatique qui constitue le risque majeur, plus qu'une augmentation homogène de température de quelques degrés.

Les modèles permettent des analyses beaucoup plus fines que celles qui ont été sommairement présentées. Cependant, ces simulations ont leurs limites : on est loin de savoir prendre en compte tous les effets biologiques, modification d'équilibres entre des effets contraires, des variations climatiques, elles mêmes encore très incertaines, ou presque inconnues, pour le régime des vents par exemple.

Durée simulée du cycle de culture (région parisienne)



M. Jean-Pierre Besancenot : *conséquences sur la santé*

Chacun sait, au moins depuis Hippocrate, que la santé humaine est à de multiples égards sous la dépendance des facteurs d'environnement en général, et du contexte climatique en particulier. Or, les météorologistes et les physiciens de l'atmosphère nous enseignent qu'à la variabilité naturelle du climat, qui a toujours existé, et a toutes les chances de perdurer, pourraient s'ajouter dans les décennies qui viennent de nouvelles modalités de variations, largement imputables à l'action humaine. La tentation est donc grande d'établir une sorte d'inventaire des conséquences sanitaires les plus plausibles d'une telle évolution du climat, à moyen ou éventuellement à long terme. Mais c'est un sujet d'une redoutable complexité. D'abord, parce que l'évolution du climat ne serait pas identique partout à la surface du globe. Ensuite, parce que l'on connaît mal les répercussions possibles d'une élévation thermique sur les autres éléments du climat, en dehors éventuellement des précipitations. Mais aussi, parce que le retentissement sur la santé serait largement tributaire du contexte socio-économique et du niveau de développement. Enfin, parce qu'il convient de distinguer avec soin, parmi les effets possibles d'un réchauffement planétaire, ceux qui s'exerceraient *directement sur l'organisme humain* et ceux qui se feraient sentir *en façonnant des conditions écologiques plus ou moins favorables à la survie, à la multiplication et au développement de tel ou tel germe pathogène, ou encore de tel ou tel vecteur de ce germe, un moustique par exemple.*

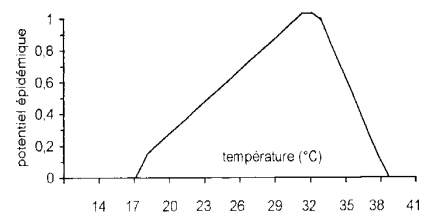
Dans ce dernier cas, ce sont surtout les maladies infectieuses et parasitaires qui sont concernées. L'exemple-type est celui du *paludisme*, dont chacun sait qu'il sévit essentiellement en zone intertropicale et sur ses marges subtropicales ; mais la question ne pourra pas être éludée du risque de résurgence de la maladie dans nos régions ... Il n'est resté pas moins que, dans l'aire d'extension des climats tempérés, aux latitudes moyennes, c'est avant tout le *stress thermique* qui, par ses effets directs sur l'organisme humain, est susceptible de modifier de façon notable les taux de morbidité et de mortalité, notamment mais pas uniquement en ce qui concerne les maladies cardiovasculaires et les affections respiratoires.

Tout cela nous conduira à quelques réflexions d'ordre très général qui tiendront lieu de conclusion, étant entendu qu'une conclusion en ce domaine ne saurait être qu'extrêmement provisoire.

Les effets indirects d'un réchauffement planétaire

Le paludisme, pris comme exemple, est à la fois l'une des maladies les plus répandues à la surface du globe, et l'une des plus sensibles aux conditions climatiques. Par delà les chiffres officiels, la réalité est certainement de 500 millions de cas cliniques par an, sur un milliard de personnes infectées. Avec 1,5 à 3 millions de décès chaque année, majoritairement des jeunes enfants sur le continent africain, le paludisme est certainement la première cause de mortalité à la surface du globe. La maladie est due à un parasite, le plasmodium, transporté dans la salive du moustique anophèle femelle ; les anophèles ont besoin d'une ambiance à la fois chaude et humide pour proliférer, et d'eau pour se reproduire, eau relativement stagnante susceptible de servir de gîte larvaire.

Une élévation de température réduirait la durée d'incubation du parasite dans le corps du moustique et augmenterait la fréquence des piqûres ; on ne peut en déduire automatiquement une aggravation de la maladie, ce serait un autre débat ; mais le *potentiel épidémique du paludisme*, évalué ci-contre dans une échelle très simple de 0 à 1 (correspondant au maximum) augmenterait notablement, tant que les températures n'atteignent pas le seuil de 32°C.



Un réchauffement pourrait augmenter le niveau de transmission en un lieu donné et permettre la transmission dans des régions où elle n'était pas possible auparavant, notamment le sud du Brésil et l'Argentine, le sud de la Chine, le nord du Sahel, le Maghreb et de nombreuses régions du Proche et du Moyen-Orient. En même temps, et c'est peut-être plus inquiétant encore, il y a lieu de redouter une extension en altitude. Aujourd'hui, les montagnes intertropicales sont habituellement indemnes au-dessus de 1400-1800 m en Asie et de 1600-1800 m en Afrique ; si les températures moyennes s'élèvent, l'altitude au-dessous de laquelle sévit le paludisme augmentera aussi ; or ces montagnes intertropicales sont pour la plupart très densément peuplées.

Les modèles de simulation réalisés donnent des résultats concordants : si, en 1990, 45% de la population mondiale vivait dans une région où sévit le paludisme, le taux pourrait atteindre 60% dans un siècle, peut-être avant, du double fait de l'extension de la zone impaludée et de la forte croissance démographique des régions concernées.

Cette évolution est-elle déjà engagée et déjà perceptible ? Certains auteurs l'affirment, mais les exemples fournis emportent rarement la conviction. S'il est indiscutable que certaines régions autrefois indemnes sont aujourd'hui touchées, il n'est pas démontré que la raison en soit une augmentation de température. Il faut consi-

dérer aussi l'évolution des précipitations, les différentes modalités d'occupation de l'espace, l'organisation sanitaire et, bien sûr, la pression démographique.

Qu'en est-il dans nos régions, et particulièrement en France ? Va-t-on assister à un retour du paludisme chez nous ?

Il ne faut pas oublier que le paludisme a sévi très largement en France jusqu'au début du siècle. S'il a été éradiqué, ce n'est absolument pas à la suite d'un refroidissement, mais parce que l'on a assaini les zones humides et les marais. Le climat, donc, n'est pas le facteur limitant et l'on se trouve aujourd'hui dans la situation d'un anophélisme sans paludisme : les moustiques susceptibles de transmettre la maladie sont présents, mais le parasite ne l'est pas. N'oublions pas non plus que des cas de paludisme importé sont régulièrement signalés, en particulier aux alentours des grands aéroports internationaux et que, chaque fois, les mesures prises ont permis d'empêcher la propagation de toute épidémie. De toutes façons, seul un apport massif de parasites, d'une souche compatible avec les populations locales d'anophèles, pourrait occasionner une reprise de la transmission ; si cela se produisait, on peut raisonnablement espérer que cette réintroduction serait rapidement détectée, circonscrite et maîtrisée. Cela vaut pour l'ensemble de l'Europe occidentale, mais on peut être beaucoup plus inquiet en ce qui concerne l'Europe de l'est et surtout les pays de l'ex-URSS : les épidémies des années 30 ont pu toucher certaines années plus de 9 millions de personnes et le système de santé y souffre aujourd'hui d'une telle désorganisation que ni la surveillance épidémiologique, ni le contrôle des vecteurs n'y sont correctement assurés ; les dernières informations transmises par l'Organisation mondiale de la santé font du reste état, en Russie et en Ukraine, de la réapparition, pour l'instant très locale, de petits foyers de paludisme.

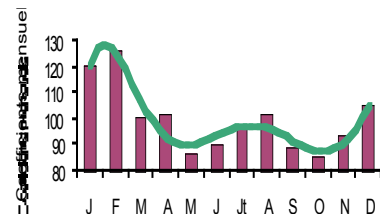
S'agissant de la France, le risque, sans être nul, paraît assez faible. Il semble que d'autres vecteurs de maladies doivent susciter davantage d'inquiétude. Par exemple, un type de moustique, *Aedes albopictus*, est un bon vecteur de plusieurs virus, en particulier celui de la fièvre dite de la vallée du Rift et le virus du Nil occidental, qui ne provoquent dans la plupart des cas que de banals symptômes fébriles, mais parfois des encéphalites très graves avec un taux de mortalité de 35%. Ce moustique, d'origine asiatique, sévit dans le nord de l'Italie depuis une dizaine d'années ; il pourrait gagner le Midi méditerranéen, où ses exigences écologiques sont d'ores et déjà satisfaites, puis à la faveur d'un réchauffement même modeste, envahir tout ou partie du pays.

Il n'empêche que dans l'ensemble des pays développés, ce ne sont pas ces effets indirects du réchauffement sur la santé qui doivent le plus retenir l'attention, mais bien ses effets directs.

Les effets directs d'un réchauffement climatique

C'est une évidence un peu trop souvent oubliée qu'une élévation de température ne peut avoir d'effet direct pathogène, ou éventuellement protecteur, que si l'être humain se trouvait déjà auparavant en limite d'adaptation aux conditions thermiques ambiantes.

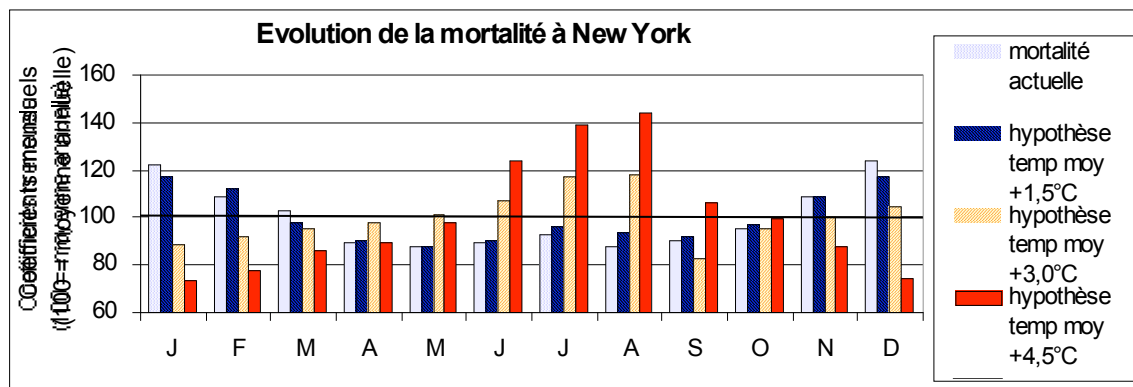
Hors des tropiques, la mortalité culmine aujourd'hui en saison froide, en plein hiver, et présente un maximum secondaire, discret en France et dans les pays voisins, au cœur de l'été (ci-contre, rythme mensuel de mortalité moyenne 1981-1994 en Italie, la valeur 100 représentant la moyenne annuelle). Le maximum principal de l'hiver disparaît quasiment en cas d'hiver particulièrement doux ; il est nettement accentué lors d'un hiver particulièrement froid.



Dans l'hypothèse d'un réchauffement, il faut donc s'attendre à une diminution relative de la surmortalité hivernale. Les pathologies les plus concernées seraient en premier lieu les maladies de l'appareil respiratoire, en second lieu les cardiopathies. A l'inverse, ce même réchauffement, à supposer qu'il concerne l'ensemble de l'année, se traduirait par une assez franche surmortalité estivale, assez peu par hyperthermie, bien davantage par suite de la recrudescence de maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, respiratoires (y compris crises d'asthme), métaboliques (notamment diabète) ou psychiques. On sait que les vagues de chaleur estivales entraînent de véritables hécatombes et on se souvient des 2.000 morts supplémentaires de fin juillet 1987 à Athènes.

En France, si l'on extrapole les constats réalisés au cours des hivers les plus froids et des étés les plus chauds des cinquante dernières années, le nombre de décès pourrait diminuer de 5 à 7% au cours du trimestre décembre-février, alors qu'il augmenterait de 12 à 18% au cours des trois mois de juin à août.

Aux Etats-Unis, où les contrastes thermiques sont plus accusés, les calculs font état de répercussions encore plus préoccupantes – ce qui pourrait déboucher sur une inversion du rythme annuel de la mortalité au milieu du siècle prochain.



Toute la question, en France aussi bien qu'aux États-Unis, reste de savoir quelle serait la résultante des évolutions opposées caractérisant les saisons extrêmes. Toutes choses égales par ailleurs, la majorité des auteurs redoute un renforcement de la mortalité, dans une classe d'âge donnée, et par suite une diminution de l'espérance de vie.

Mais il ne faut pas dissimuler que d'autres études, apparemment conduites avec la même rigueur scientifique, sont arrivées à une conclusion opposée, notamment aux Pays-Bas et en Australie. De telles contradictions tiennent, pour une part, à l'incertitude des modèles. Mais il est également vraisemblable que les répercussions d'un réchauffement climatique varieraient notablement d'une région à l'autre ; c'est ainsi qu'en France, on peut s'attendre à un accroissement des gradients Nord-Sud et Est-Ouest, ainsi qu'à un renforcement du nombre de décès au plus fort de l'été dans les grandes villes de l'intérieur, qui paient déjà aujourd'hui le plus lourd tribut aux principales vagues de chaleur.

En fait, tout dépendrait très certainement de la brutalité avec laquelle s'opérerait un tel réchauffement, sans doute assez bien supporté s'il intervient progressivement, beaucoup plus nocif s'il se fait par à-coups relativement violents, l'organisme n'ayant alors pas le temps de s'adapter. Or un certain nombre de modèles, en particulier celui de la NASA, font état d'un réchauffement "en marches d'escalier", avec des poussées relativement brutales.

Pour conclure, je dirai que l'on ne saurait dissimuler l'immensité de notre ignorance et l'étendue des incertitudes. Cela vaut d'abord pour les incertitudes scientifiques concernant le réchauffement planétaire, les impacts sur les déterminants de la santé et la santé elle-même : dans l'hypothèse d'une baisse d'intensité de la dérive Nord Atlantique, courant chaud issu du Gulf Stream, le Nord-Ouest de l'Europe serait confronté à un refroidissement, et ce qui a été dit ci-dessus serait à inverser. Mais cela s'applique aussi aux incertitudes socio-économiques relatives aux réponses de la société, qui seront de toute façon fonction de la situation économique, politique, technologique...

Pour le paludisme par exemple, la situation qui a été décrite pourrait se trouver radicalement transformée par la mise au point d'un vaccin à la fois bon marché et durablement efficace. Plus largement, les progrès réalisés dans la prévention et/ou le traitement des maladies ont des chances d'annihiler certains des effets nocifs que l'on a signalés. Il convient en outre de rester très attentif au fait que, si l'on doit effectivement connaître un changement climatique, celui-ci aura une forte probabilité de s'accompagner d'une multiplication d'événements extrêmes, à l'image de ceux que le monde a vécus fin 1999. Or, ces grands paroxysmes météorologiques, tantôt très localisés et tantôt extrêmement étendus, peuvent avoir de multiples répercussions sur la santé par leurs effets traumatiques immédiats, mais également par les épidémies susceptibles de se déclencher à leur suite et par la pathologie psychosomatique (pathologie de stress) qui s'inscrit durablement dans leur sillage. Là encore, le contexte aura son importance : pour ne prendre qu'un exemple, les épidémies seraient rapidement jugulées dans les pays riches, si tant est qu'elles s'y déclenchent, mais leur bilan pourraient être catastrophique dans les pays les plus démunis...

Une difficulté permanente est que l'on est obligé, lorsque l'on échafaude des scénarios, de raisonner "toutes choses égales", donc en s'appuyant largement sur la situation actuelle. Il importe donc de toujours relativiser les conclusions, sans céder au catastrophisme.

Par ailleurs, ce serait une grave erreur que de considérer les effets de l'évolution du climat hors de tout contexte. Par exemple, si le paludisme constitue un risque grave, c'est non seulement en raison du réchauffement climatique, mais parce que les pays concernés sont sous-développés et connaissent une très forte croissance démographique. Si les vagues de chaleur estivales risquent d'être de plus en plus meurtrières dans nos régions,

c'est aussi parce que la population vieillit, les personnes âgées étant plus sensibles, et parce que la population se concentre de plus en plus dans de grandes agglomérations où la température est plus élevée qu'aux environs (1).

On ne doit pas oublier qu'une dégradation de l'état de santé résulte toujours de la convergence d'un risque exogène et d'une particulière vulnérabilité de la population exposée.

Si je devais finalement ne retenir qu'un mot, ce serait donc prudence ! *Mais prudence n'est pas attentisme*. Il faut être vigilant, surveiller l'évolution, en particulier mettre en place des systèmes de surveillance épidémiologiques pour pouvoir réagir avant qu'il ne soit trop tard. Car, si l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare. Et je crois que nous serions coupables de ne pas prendre les mesures qui peuvent l'être et, en tous cas de ne pas se préparer à les prendre le jour où elles s'avèreront nécessaires.

M. Jacques Labre : conséquences sur les ressources en eau

Je ne prétends pas développer des considérations géostratégiques liées à l'effet du changement climatique sur les ressources en eau, mais simplement apporter quelques éléments pour éclairer ce sujet, souvent présenté à l'emporte-pièce dans les médias. Je traiterai successivement des sujets suivants :

- quelques effets possibles du changement climatique sur les ressources en eau ;
- la « robustesse » des systèmes de mobilisation des eaux face à un changement qu'il faut d'ailleurs mettre en perspective, le climat étant par nature aléatoire et ses variations naturelles importantes ;
- la sensibilité des sociétés et des économies aux perturbations des cycles hydrologiques ;
- les aspects géopolitiques.

Les ressources en eau

Les résultats des divers modèles climatiques, assez dispersés pour les variations locales de température, le sont encore plus pour celles des précipitations. On peut dégager un certain consensus sur le fait :

- qu'il y aurait une augmentation globale planétaire des précipitations moyennes ;
- que cette augmentation serait plutôt localisée dans les régions circomboréales, des pôles aux régions tempérées, tandis que les précipitations diminueraient aux latitudes tropicales (30°N et 30°S) ;
- que l'intensité et la fréquence des phénomènes exceptionnels augmenteraient.

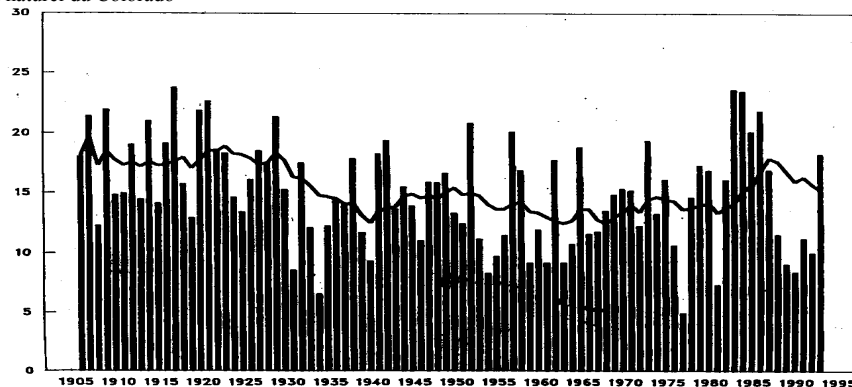
Les modèles divergent beaucoup sur les précipitations dans les zones équatoriales et sur les calottes polaires.

Les écoulements

Les flux des écoulements de surface et souterrains, qui constituent les ressources renouvelables, sont encore plus difficilement prévisibles car leur variabilité amplifie celle des précipitations : c'est le solde entre une pluviométrie et une évaporation (environ 50% dans les pays tempérés). La variabilité aléatoire des écoulements, des fleuves, est très supérieure à celle de l'évolution séculaire que l'on pu essayer de détecter au cours du siècle passé. Les écoulements sont aussi influencés par les changements dans l'occupation des sols.

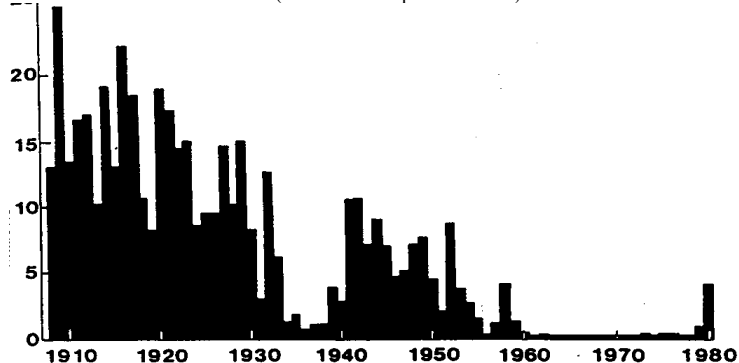
Par exemple, l'évolution depuis un siècle de l'écoulement « naturel » dans la partie moyenne du Colorado montre des variations aléatoires très fortes, de 1 à 4, et une tendance apparente, mais incertaine, à la baisse. Si l'on considère non plus les débits naturels reconstitués (en ajoutant les prélèvements), mais les débits réels à l'embouchure, on constate une baisse très importante due à l'augmentation des prélèvements, qui atteignent, dans le cas du Colorado, la totalité de la ressource renouvelable. C'est, plus généralement, l'augmentation des prélèvements qui donne au public l'impression que la sécheresse s'est accentuée.

Écoulement naturel du Colorado



(1) Une vague de chaleur a fait 500 victimes à Chicago en 1995 ; la température en centre ville était supérieure de 5 à 6°C à celle qui régnait en banlieue, et de 7 à 8°C à celle des campagnes distantes de 25 ou 30 km.

Écoulement réel du Colorado à l'embouchure (incidence des prélèvements)



Dans le cas de la Loire, on constate qu'il n'y a pas d'évolution évidente depuis un siècle.

Dans le cas du Chari, fleuve tropical, à N'Djamena, on constate que le débit moyen inter annuel n'est plus que le tiers de celui des années 60 et que la surface du lac Tchad, qu'il alimente, a été divisée par 10 en une quinzaine d'années. Mais on ignore s'il s'agit d'une évolution cyclique de longue période ou d'une évolution durable.

L'utilisation de l'eau

Le premier consommateur mondial net (différence entre prélèvement et restitution au milieu de quantités réutilisables), est, de très loin, l'agriculture. La part de l'agriculture dépasse 80% ; l'estimation dépend des modes de calcul : elle atteint 90% dans le tableau des consommations mondiales de Shilkomanoff, un des meilleurs experts en la matière. Le principal enjeu d'une raréfaction de l'eau porte sur des contraintes d'autosuffisance alimentaire, notamment dans les pays qui ont besoin de recourir à l'irrigation pour nourrir leur population.

L'existence de marges considérables d'amélioration de l'efficacité de l'eau en agriculture tempère un peu les craintes de pénurie ; ce n'est pas facile car il faut des investissements conséquents et une formation des agriculteurs, mais c'est technologiquement possible. Dans les systèmes traditionnels utilisés dans les pays sous-développés, il n'a à peu près que la moitié de l'eau prélevée qui bénéficie effectivement à la plante.

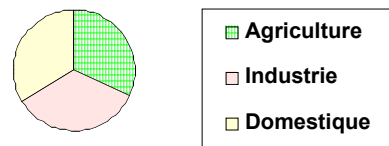
Si l'eau est correctement épurée avant d'être restituée au milieu, elle peut resservir. Les enjeux de qualité de l'eau sont donc étroitement liés aux enjeux de quantité. L'usage de l'eau n'est pas comparable à celui du pétrole.

Un élément déterminant dans les projections de bilans hydrologiques dans les pays en développement est l'effet de l'évolution démographique, qui prime certainement sur celui de l'évolution climatique. Quand on voit, par exemple, que la population de l'Éthiopie pourrait augmenter de 60 millions de personnes en 2025, on comprend que cette évolution déterminera plus les possibilités de satisfaction des besoins en eau que l'évolution climatique à long terme.

La demande en eau présente une certaine élasticité par rapport aux prix, qui pourrait constituer un moyen d'ajustement. Cela peut être important pour les usages économiques dans l'industrie et l'agriculture, pour lesquels l'eau est un facteur de production comme un autre. Pour la demande domestique, les résultats sont assez dispersés ; on cite des valeurs de -0,2 à -0,7, c'est à dire qu'une augmentation du prix de 10% entraînerait une réduction de consommation de 2 à 7%. Mais en fait ces comportements sont très difficiles à modéliser et les informations obtenues par sondage ne sont pas cohérentes.

En France, la consommation nette d'eau douce se répartit sensiblement à égalité entre les secteurs agriculture, industrie et domestique.

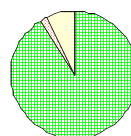
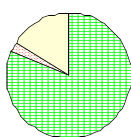
France (1998)



Dans les pays où l'irrigation est pratiquée à grande échelle, l'agriculture représente plus de 80%, plus de 90% dans les pays en voie de développement, l'Égypte par exemple.

Espagne (1990)

Égypte (1993)



Conséquences possibles, directes et induites, de l'effet de serre sur les populations

La notion de rareté de l'eau n'est pas une notion simple, parce que l'eau est une ressource multi-usages et que l'ordre de grandeur des besoins et des ratios de consommation nette sont très différents. Dans un pays où l'alimentation de la population dépendrait totalement des cultures irriguées, l'Egypte par exemple, il faut 1.800 m³/hab./an pour assurer l'autosuffisance alimentaire, soit 1.000 fois les besoins en eau alimentaires directs.

	Besoins en eau (m ³ /habitant./an)	Ratio de consommation nette de l'ordre de 100%
Boisson et cuisine	1,5	" " 12%
Usages domestiques	50	" " 0
Transport des déchets	40	" " 5%
Autres urbains et industriels	100	" " 70%
Irrigation	1.800	" " 0
Hydroélectricité, navigation	n.s.	" " 0
Ecosystèmes, tourisme	?	" " 0

Les prélèvements bruts n'ont évidemment aucune signification pour les bilans : EDF n'est pas le principal consommateur d'eau en France.

Quant aux réponses possibles à la question de l'avenir des ressources en eau, il est évident que des réflexions générales ne sont pas pertinentes: l'eau n'est pas une ressource globale mondiale et n'y a pas de marché mondial de l'eau. Les analyses ne sont pertinentes qu'à l'échelle du bassin versant. Les conditions ont très variables selon les pays et à l'intérieur même des pays.

Pour l'Afrique en 2025, les ressources en eau renouvelables seront inférieures à 150 m³/habitant./an, seuil de ressources vitales pour l'alimentation, l'hygiène et les fonctions de services urbains, dans un pays, la Libye, qui dispose heureusement de ressources souterraines fossiles considérables. Les pays du Maghreb, l'Afrique du Sud et, en raison de la densité démographique, certains pays de montagne comme le Ruanda, le Burundi et le Malawi disposeront de moins de 550 m³/habitant./an ; l'économie y restera fortement contrainte et l'autosuffisance alimentaire impossible. Les autres pays ne devraient pas être confrontés à des tensions majeures, tout au moins si l'on considère les moyennes agrégées ; ce n'est pas parce que de l'eau coule à la frontière sud de la Mauritanie qu'il n'y aura pas de problème à Nouakchott.

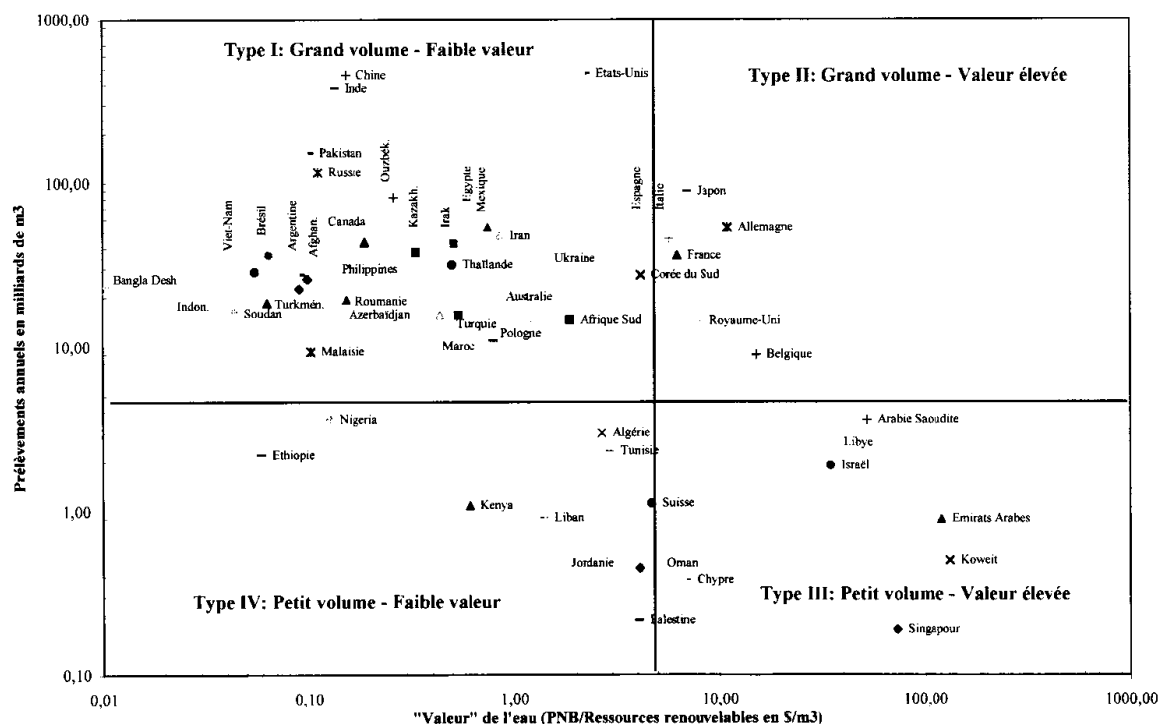
Au Moyen Orient, la situation est très hétérogène. A l'exception de l'Irak, les pays qui disposent actuellement de ressources permettant l'autosuffisance alimentaire (Iran, Syrie, Turquie) seront dans une situation difficile en 2025.

Gestion de l'eau

On peut établir une typologie des pays en ce qui concerne la gestion de leurs ressources en eau, en utilisant un indicateur grossier de la "valeur" de l'eau : division du PNB par le volume des ressources utilisées.

En portant sur un graphique cet indicateur (\$/m³) en abscisse et en ordonnées les prélèvements annuels (milliards de m³) on fait apparaître des groupes de pays :

Caractérisation du marché de l'eau : exemple de 57 pays



Les pays qui se situent dans la partie droite sont des pays industrialisés dont l'économie est basée sur des services et des pays nordiques dont l'agriculture ne consomme pas beaucoup d'eau ; les pays du quart supérieur gauche sont de grands consommateurs d'eau pour l'agriculture, comme la Chine et les USA, avec une valeur de l'eau relativement faible. On voit tout de suite qu'une raréfaction des ressources sera plus facile à supporter par les pays de la partie gauche du graphique, qui ont une valeur ajoutée de l'eau plus faible que les pays de la partie droite.

Le type de gestion des ressources dépend fortement du taux de pression actuel de la demande sur la ressource. Si l'on considère comme critère le plus pertinent de mesure du "stress" le rapport consommation nette sur ressources renouvelables, on a 4 groupes de pays :

- ceux qui sont dans une économie de production : il faut dessaler de l'eau de mer ou épuiser des ressources fossiles : c'est le cas de l'Arabie Saoudite, de la Libye, bientôt le cas d'Israël ;
- les pays qui se trouvent dans une économie de répartition, c'est à dire que l'eau fait défaut dans certaines régions peuplées, mais il y a des ressources excédentaires dans d'autres régions et donc on transfère l'eau par de grands équipements nationaux : c'est le cas de l'Afrique du Sud, des Etats-Unis, d'Israël, un peu de l'Espagne ;
- des pays comme la France où l'eau fait défaut de manière saisonnière, sans qu'il y ait nécessité de transferts massifs entre bassins versants différents ;
- des pays qui sont dans une économie de cueillette où les débits sont suffisants toute l'année pour répondre à la demande locale ; c'est le cas des pays équatoriaux ou nordiques.

En France, le taux d'utilisation des ressources renouvelables annuelles est de l'ordre de 15%. Il est de 40% pour la Californie, le Maroc ou l'Espagne.

Robustesse et vulnérabilité par rapport aux variations du climat

Il faut d'abord rappeler que les systèmes ont été conçus pour gérer des ressources fortement aléatoires, même en pays tempérés. Il existe des facteurs de "robustesse" naturels, par exemple la taille des réserves souterraines accessibles dans le pays : par exemple la Californie dispose d'un volant de 6 années de consommation, tandis que la Bretagne est très sensible aux sécheresses temporaires ; des phénomènes de compensation des précipitations jouent pour les grands bassins versants, surtout quand ils comprennent plusieurs zones climatiques comme celui du Nil, tandis que cette "mutualisation" ne peut jouer pour les petits. L'accès à l'eau de mer peut être un facteur de robustesse dans la mesure où l'on considère le dessalement comme une solution ultime, mais, a contrario, l'insularité est un handicap.

La capacité de stockage des systèmes constitue un facteur structurel de robustesse ; par exemple le fleuve Colorado dispose de 4 années d'écoulement moyen dans de grands réservoirs, ce qui a évité des crises majeures. La concentration de la demande est un facteur de vulnérabilité ; lorsque l'on a à desservir de grandes métropoles, il y a saturation des capacités des ressources locales et si elles viennent à diminuer, il faut aller chercher de l'eau très loin, à plus de 50 km pour beaucoup de grandes métropoles, Mexico par exemple. Les interconnexions sont, bien sûr, un facteur de robustesse.

Mais les facteurs non structurels sont au moins aussi importants. Les possibilités d'adaptation dépendent du niveau de pression sur les ressources, de la flexibilité de la demande, en termes d'élasticité demande/prix, mais aussi de possibilités de réallocation de ressources entre l'agriculture et les autres usages et puis aussi de l'existence d'un système consensuel planifié de gestion des crises.

D'où peuvent provenir de nouvelles ressources ?

Les réponses viendront plus des modes de gestion que de la technologie ; par ordre décroissant d'importance :

- 1) l'importation "d'eau virtuelle" à travers le commerce des aliments : importer une tonne de blé, c'est économiser 1000 tonnes d'eau qui aurait été utilisée pour la produire. Le problème des pays arides et semi-arides n'est pas tant celui de l'autosuffisance que celui de la sécurité alimentaire.
- 2) les économies d'eau en agriculture
- 3) les transferts d'eau
- 4) les économies d'eau dans les usages industriels et urbains
- 5) la réutilisation d'eaux usées
- 6) le dessalement.

Comment améliorer la robustesse des systèmes

- 1) il faut d'abord faire des analyses de vulnérabilité, concept peu développé pour les systèmes hydrauliques
- 2) ensuite, il faut certainement réviser les règles de conception et de gestion des systèmes hydrauliques qui sont fondés sur la stabilité du climat ; je pense évidemment aux périodes de sécheresse, mais aussi à la fréquence et à l'intensité des crues qui nécessiteront dans beaucoup de pays une augmentation des capacités des déversoirs de crues des barrages.

Conséquences possibles, directes et induites, de l'effet de serre sur les populations

- 3) la restauration de la qualité de l'eau est essentielle, la pollution de l'eau constituant dans beaucoup de cas la cause essentielle de pénurie.
- 4) constitution de banques d'eau ; par exemple dans l'ouest des USA on commence à stocker de l'eau en sous-sol, d'abord pour reconstituer des ressources surexploitées dans le passé, ensuite pour constituer des stocks pour l'avenir ; tout un système juridique et fiscal incite les agriculteurs à utiliser les ressources de surface plutôt que les souterraines considérées comme une épargne d'eau.
- 5) gérer la demande : on peut par exemple pratiquer des jachères contractuelles comme en Californie où des entités de distribution d'eau qui n'ont pas de droit d'accès à l'eau permettant de garantir une priorité pallient cette fragilité en cas de sécheresse par des accords avec des agriculteurs qui acceptent, dans certaines conditions de ne pas cultiver leurs terres en cédant momentanément leurs droits d'eau ; on peut évidemment réguler la demande par la tarification.
- 6) mettre en place un système d'assurance des agriculteurs contre les dommages de la sécheresse pour limiter la vulnérabilité de l'économie à une pénurie d'eau aléatoire.

Valeur économique de l'eau

Le coût d'opportunité de l'eau est en général très différent des tarifs pratiqués et très supérieur, comme le montrent les ordres de grandeur ci-dessous :

	Coût d'opportunité (US\$/m ³)	Externalités
Eau potable	200	+++
Eau domestique	> 1	++
Transport des déchets	> 1	--
Autres urbains et industriels	0 à 10	-
Irrigation	0,04	--
Energie (par 100 m de chute)	0,01	-
Récréation	?	+
Ecosystèmes, pêche	?	++

La flexibilité favorisant l'usage le plus valorisant améliore la robustesse du système ; mais l'économie de marché trouve ses limites culturelles, politiques et sociales. Le coût des nouvelles ressources accessibles en cas de pénurie augmente avec le niveau des besoins ; il reste inférieur à 1 US\$/m³ pour la ressource ultime du dessalement de l'eau de mer, ce qui est acceptable pour l'eau potable dans les pays développés. Le spectre de la pénurie, que l'on agite quelquefois, ressort d'un catastrophisme exagéré en ce qui concerne la demande urbaine. Il y a déjà des pays en développement, comme les îles du Cap Vert, où le dessalement procure une part significative des ressources nécessaires à la consommation urbaine.

Evaluation des risques liés aux effet d'une variation climatique

Dans beaucoup de pays, le premier risque est celui des crues, avant d'être celui de la sécheresse. Aux USA, le coût correspondant est évalué à 5,7 milliards de \$ par ans ; c'est aussi le plus important en termes de vies humaines.

Dans certains pays, comme le Bangladesh, la montée du niveau des mers peut causer des dommages énormes et nécessiter des investissements de protection considérables. La remontée des eaux salées dans les estuaires va restreindre les ressources disponibles pour les agglomérations littorales.

La sécheresse peut avoir des effets pénalisants lourds pour des pays dans lesquels la production agricole est une ressource économique importante, le Maroc par exemple. Mais dans les pays développés, c'est plutôt la réduction du potentiel hydroélectrique qui se traduit en pertes économiques en nécessitant un recours supplémentaire aux hydrocarbures ; il peut aussi y avoir nécessité d'arrêter des centrales thermoélectriques lorsque le débit des cours d'eau devient trop faible pour assurer le refroidissement.

Pour dire un mot de géopolitique, l'eau peut être perçue comme un facteur de conflit si l'on considère que 50% de la population vit dans un bassin hydrologique international et qu'il n'y a pas de droit international reconnu. Quelques pays ont passé des accords bilatéraux (2), une vingtaine ont signé une convention d'Helsinki, quatre seulement ont ratifié la convention de l'ONU sur les fleuves et lacs internationaux, approuvée par son Assemblée générale il y a 2 ans, après 25 ans de mise au point ; il n'y aura toujours pas de droit international sur la répartition des ressources en eau en avril 2000, date limite de ratification. De toutes façons, il n'y a pas d'autorité reconnue pour faire appliquer ce droit.

La forte portée symbolique de l'eau contribue souvent à amplifier l'utilisation de l'eau comme un argument de politique locale.

Malgré tout, je crois que "la guerre de l'eau n'aura pas lieu". Sur les quelques 140 conflits dénombrés dans le monde depuis la 2^{ème} guerre mondiale, c'est seulement dans 7 à 9 cas que l'eau a été l'un des facteurs

(2) Certains reposent implicitement sur une stationnarité du climat en fixant des volumes en valeur absolue ; par exemple, le traité entre l'Égypte et le Soudan réserve 55 milliards de m³ à l'Égypte : si le débit du Nil diminue, ce sont les autres qui en subiront les conséquences.

significatifs du déclenchement ; par exemple, malgré 3 conflits armés depuis l'indépendance, l'Inde et le Pakistan n'ont jamais remis en cause le partage des eaux de l'Indus.

Comment expliquer le fait que malgré des situations très tendues, la tendance soit plutôt à la détente ? Une intervention militaire serait très rarement pertinente pour contrôler des ressources en eau. Comment empêcher un pays du bassin supérieur de consommer de l'eau, sinon par la destruction complète des infrastructures et la suppression d'une partie de la population. L'effort militaire serait beaucoup plus coûteux que la réalisation des équipements nécessaires pour créer des ressources supplémentaires. Les solutions négociées sont souvent porteuses d'avantages réciproques : meilleure régulation des barrages, navigation, etc. Il y a donc souvent une incitation économique forte à éviter les conflits.

DEBAT

M. Jancovici remercie les conférenciers et ouvre le débat en demandant de commencer par les questions portant sur les impacts agricoles.

Intervention : les effets climatiques sur les plantes ont été présentés avec simultanément une augmentation de la température et de la luminosité et une diminution de la pluviométrie ; cela n'est-il pas en contradiction avec les résultats des modèles présentés lors de la réunion précédente, qui semblaient prévoir une augmentation de la nébulosité et de la pluviométrie dans la partie septentrionale de l'hémisphère nord ?

M. Delécolle : ces résultats moyens ne sont pas très significatifs à la latitude de la France et les conclusions des simulations des climats régionaux sont moins nettes. J'ai surtout voulu montrer l'interaction des facteurs en présentant un cas d'école. Si les prévisions locales sont différentes, la combinaison des facteurs conduit à des conclusions différentes, mais le mode de raisonnement reste valable.

Intervention : la récente conférence mondiale de l'énergie a fait des projections de besoins énergétiques pour le siècle qui vient ; pour boucler le bilan dans certains scénarios, il faudrait mettre en exploitation des cultures énergétiques sur des surfaces considérables, presque autant que pour l'alimentation. Dans ce cas, cela ne poserait-il pas des problèmes de ressources en eau ?

M. Delécolle : dans l'esprit de ceux qui font des recherches sur la biomasse énergétique, il s'agit de choisir des espèces végétales qui produisent peu de grains (sauf le cas du colza) et sont peu consommatrices d'eau ; ces plantes doivent aussi pouvoir se cultiver sur des zones marginales où l'on n'envisage pas d'équipements hydrauliques. Evidemment, il serait impossible de couvrir l'ensemble des besoins en énergie par la biomasse.

Intervention : les effets sur les plantes annuelles peuvent ne pas être très graves, mais qu'en est-il pour les plantes pérennes et notamment les forêts soumises à des variations climatiques rapides ?

M. Delécolle : je vous ai parlé des effets de la variabilité pour les plantes annuelles. C'est effectivement plus grave et plus complexe pour les plantes qui ont une « mémoire » d'une année sur l'autre ou, dans le cas des arbres, sur plusieurs années. Par exemple, on commence à se dire que le « dépérissement forestier », attribué initialement aux pluies acides envoyées par les pays de l'est, a été en grande partie dû à un « effet retard » de sécheresses enregistrées les années précédentes. Pour une année donnée, sans tenir compte de cet effet, le raccourcissement du cycle de végétation sera surtout dommageable aux essences à feuilles caduques, tandis que les essences à feuilles pérennes (la plupart des conifères), dont l'enracinement est plus superficiel, souffriront surtout d'une réduction des apports d'eau. Mais dans les simulations, on ne sait pas encore véritablement prendre en compte l'alternance de conditions favorables et défavorables. Pour les arbres, on peut espérer parvenir à mieux comprendre ces effets grâce à la dendrochronologie qui permet de corréler croissance et climat sur de longues périodes. Actuellement, je ne puis vous donner des réponses nettes.

Intervention : a-t-on pu déterminer les limites de résistance des principales espèces cultivées dans le monde aux variations de température ou aux modifications de pluviométrie ?

M. Delécolle : il n'est pas difficile de soumettre une même culture à différents régimes de température dans une batterie de chambres climatisées, un phytotron. On a donc un tableau de températures critiques pour un très grand nombre de plantes. Mais ces résultats ne concernent que la température, les essais se faisant toutes choses égales par ailleurs. Il est trop coûteux de reconstituer les variations de l'ensemble des facteurs. On dispose d'autre part de résultats de l'efficacité des apports d'eau d'irrigation. On connaît donc pour les principales espèces la limite inférieure pour l'obtention d'une production donnée et le coefficient production sur quantité d'eau apportée. Mais cela ne concerne que les plantes cultivées.

Intervention : comment se situent ces limites par rapport aux valeurs prévisibles de température ?

M. Delécolle : pour les températures, on est loin de ces limites. On se trouverait plutôt dans une phase où le réchauffement, sauf exceptions, aurait un effet favorable.

Intervention : est-ce que les modèles de simulation ont été testés par comparaison avec ce qui s'est passé depuis quelques décennies, où l'on a vécu un certain nombre de variations ?

M. Delécolle : cela nous est souvent demandé, mais en fait on n'a pas essayé. Le complexe de variables climatiques du passé est fort différent de celui obtenu avec les modèles climatiques utilisés dans les simulations ; il ne semble pas que les comparaisons puissent être pertinentes.

Intervention : a-t-on une idée du temps nécessaire au retour à la situation antérieure, hors interventions humaines, après passage d'un phénomène extrême, un cyclone tropical par exemple ?

M. Delécolle : plus près de nous on a l'expérience des incendies en zone méditerranéenne. Les écologues savent quelles sont les successions végétales hiérarchisées et les durées nécessaires pour chaque phase. Il existe des modèles dynamiques bien calés. Le retour à la situation antérieure peut demander très longtemps, même si les premières phases sont rapides. Des modèles analogues doivent exister pour l'évolution après un cyclone tropical ; je ne les connais pas, mais il est probable que les successions sont plus rapides.

Intervention : n'y a-t-il pas des cas de récupération impossible ?

M. Delécolle : effectivement, lorsque le sol a été très dégradé, à la limite lorsque l'érosion a mis à nu la roche mère, l'implantation naturelle d'un premier stade de végétation demande des délais considérables.

Intervention : pour l'usage des ressources en eau, peut-on envisager un système de permis négociables, ce qui donnerait une base pragmatique à l'agence internationale de l'eau dont la création est envisagée ? Au Moyen-Orient un système d'échange eau contre pétrole serait-il envisageable ?

M. Labre : des mécanismes aussi sophistiqués ne sont pas nécessaires : l'existence d'un marché international des produits alimentaires permet aux pays pauvres en eau et disposant de ressources d'une autre nature de rationaliser l'usage de l'eau en ne la consacrant pas à des productions agricoles fortes consommatrices ; ils pourraient privilégier l'importation des denrées qui leur sont nécessaires plutôt que de cultiver à grands frais localement des céréales ou des fourrages. Or on peut constater que les décisions politiques des Etats concernés sont souvent irrationnelles. Par exemple, l'Arabie Saoudite a développé un système d'utilisation massive de ses ressources fossiles en eau pour obtenir des produits à faible valeur ajoutée ; elle était jusqu'à une date récente exportatrice de céréales. Malgré le mythe de reverdissement du désert, cette attitude est en train d'évoluer. Par exemple l'objectif du projet de grande rivière artificielle de la Libye (32 milliards de dollars) est maintenant réorienté du développement agricole vers la satisfaction des besoins urbains des zones côtières. En Israël, l'agriculture, qui a été le fleuron du développement, voit maintenant sa consommation d'eau contingentée en période de sécheresse.

Mais il ne faut pas négliger les contraintes d'ordre social. Dans un pays comme l'Egypte, en admettant qu'il ait les moyens d'importer une plus forte proportion de sa nourriture, qu'advierait-il du taux de chômage d'une population dont plus de la moitié travaille dans l'agriculture ? L'économie de marché ne peut pas s'appliquer d'une manière flexible à ces questions de ressources en eau car bien d'autres acteurs sont à prendre en compte. Une réorientation peut demander plusieurs générations.

Intervention : l'évolution des risques sanitaire n'est-elle pas liée à l'interdiction de l'usage de certaines molécules, en particulier le DDT, en cas d'inconvénients pour certaines espèces ? Dans quelle mesure une autorisation d'usage du DDT pourrait-elle limiter voire supprimer les effets climatiques sur l'extension du paludisme ?

M. Besancenot : il ne faut pas oublier que de plus en plus de variétés d'anophèles sont devenues résistantes au DDT, et les expériences montrent qu'elles le sont restées ; elles le sont aussi à bien d'autres produits, de la même façon que les hématozoaires sont devenus de plus en plus résistants à certains médicaments, les plus répandus parce que bon marché.

Intervention : dispose-t-on aujourd'hui d'une évaluation relative des facteurs de risques sanitaires liés à une augmentation de la température globale ? A-t-on une idée de l'importance de ces risques par rapport aux autres grands facteurs de risques sanitaires, au niveau global, et aux niveaux régionaux ?

M. Besancenot : quelques tentatives ont été faites, mais je dois dire que les résultats sont tellement discordants qu'il paraît difficile d'en tirer des enseignements ; les effets d'un réchauffement climatique ne peuvent être séparés de tout le contexte et d'autre part il faut prendre en compte quantité d'interactions.

Dans le cas de la vague de chaleur de juillet 1987 à Athènes - 2000 décès en surnombre, plusieurs dizaines de milliers d'hospitalisations - quelle est la part de la chaleur et celle de la pollution atmosphérique ? Les deux phénomènes sont liés à la même situation aérologique. Il faut aussi prendre en compte la défaillance de la protection civile et du système médical : les rapports faits à l'époque sont stupéfiants ; par exemple dans des hôpitaux, non

climatisés, on n'a pas utilisé les ventilateurs car leur déstockage nécessitait l'autorisation d'un responsable absent ; on pourrait multiplier les exemples. Athènes a connu en 1988 la même vague de chaleur, avec la même situation isobarique, mais les autorités ont tiré les leçons de ce qui s'était passé l'année précédente et pris les dispositions nécessaires. D'une part, des mesures ont été prises pour réduire la pollution atmosphérique : les 50 industries les plus polluantes ont été sommées de cesser toute activité, les autres de la réduire de 25 à 75% ; le résultat a été que l'on n'avait jamais vu sur Athènes depuis plusieurs décennies un ciel aussi pur en été. D'autre part, l'ensemble des services d'assistance et de secours a été mobilisé ; des informations ont été diffusées ; on a invité les personnes fragiles à se rendre dans les bâtiments public climatisés, ouverts jour et nuit. En dépit d'une chaleur aussi forte, la surmortalité du mois de juillet n'a pas été de 2000 personnes, mais d'une quinzaine, ce qui ne constitue pas une augmentation significative.

Donc je crois qu'il ne faut pas chercher à évaluer uniquement l'effet d'une élévation de température sur la santé, mais toujours replacer cette question dans un contexte beaucoup plus large.

Intervention : pour assurer un usage plus rationnel de l'eau, ne peut-on agir sur l'élasticité de la demande en agriculture ? Par exemple, on parle d'importer à Barcelone de l'eau du Rhône, alors que l'eau de l'Ebre est envoyée dans le sud de l'Espagne, où elle n'est pas payée par les agriculteurs qui produisent fruits et légumes pour l'exportation. Si on facturait l'eau, n'obtiendrait-t-on pas naturellement un équilibre plus satisfaisant ?

M. Labre : ce ne serait pas une solution radicale à tous les problèmes de tension sur l'eau, mais certainement une des mesures les plus efficaces. C'est un fait qu'en général l'eau n'est pas payée à son vrai prix par les agriculteurs. Il y a assez peu de pays où les irriguants paient ne serait-ce que les frais de fonctionnement des systèmes d'irrigation. Il y a même des systèmes pervers. Par exemple dans l'ouest des USA, où 80% de l'eau est utilisée par l'agriculture, vous perdez votre droit d'eau si vous ne l'utilisez pas ; donc les agriculteurs sont incités à surconsommer pour éviter l'utilisation de leurs droits par d'autres utilisateurs.

Intervention : on peut assez facilement faire payer l'usager avec les compteurs des systèmes sous pression, type Canal de Provence. Comment faire avec les systèmes gravitaires qui ne sont pas maîtrisables ?

M. Labre : on peut évaluer les volumes en maîtrisant les débits par les caractéristiques des canaux et en organisant l'ouverture de vannes avec des tours d'eau, dispositions de toutes façons nécessaires pour l'équilibre du réseau.

Intervention : la consommation moyenne par personne que vous avez indiquée pour la production agricole ne sera-elle pas diminuée par une amélioration de l'efficacité des réseaux, un peu partout en cours dans le monde ?

M. Labre : probablement. Mais le régime alimentaire est un facteur beaucoup plus important ; une alimentation à base de bœufs nourris avec des fourrages irrigués nécessite 200 fois plus d'eau qu'un régime à base de pommes de terre. Les valeurs moyennes indiquées sont évidemment très relatives ; elles ont été avancées pour les pays du Moyen-Orient qui ont des régimes alimentaires peu riches en viande.

Intervention : la variabilité climatique n'a-t-elle pas augmenté ces dernières années ? Les dernières inondations de l'Aude ne sont-elles pas un indice de cette évolution ?

M. Besancenot : il faut tout de même penser que la variabilité climatique a toujours existé et a toujours été marquée dans l'aire d'extension des climats tempérés. On a toujours tendance à être frappé par ce qui se passe actuellement en oubliant ce qui s'est passé auparavant. L'examen des relevés météorologiques, et l'on commence à avoir des séries longues, montre que les phénomènes actuels ont des précédents tout aussi fréquents. En fait, c'est surtout la vulnérabilité de la société qui a beaucoup augmenté.

Intervention : c'est tout à fait évident pour les inondations.

M. Jancovici : ces questions ont été débattues lors de la séance précédente. Il résulte des modèles climatiques une prévision d'augmentation de la température moyenne et d'autre part qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes est très probable. Si on peut mesurer de manière effective une élévation de la température moyenne depuis le début de l'ère industrielle, une augmentation de la variabilité ne pourra être constatée que par une analyse statistique *a posteriori* sur une série longue et les phénomènes météorologiques récents ne sont pas constitutif d'un échantillon suffisant pour permettre une telle analyse statistique.

Intervention : a-t-on pu apprécier l'effet d'une augmentation de température sur la rapidité des mutations dans l'évolution des micro-organismes pathogènes pour l'homme et les autres espèces ?

M. Besancenot : Ce sont des recherches qui débutent et n'ont pas encore donné de résultats. C'est une question qui intéresse beaucoup de médecins et un programme de recherche piloté par l'OMS doit être lancé prochainement.

Intervention : existe-t-il une étude historique permettant de constater une relation entre température et rythme de mutations ?

M. Besancenot : pratiquement pas.

Intervention : au sujet du paludisme, vous avez indiqué que la population concernée pourrait passer de 45 à 60%. Quelle serait la part provenant de l'évolution démographique et celle imputable au climat ?

M. Besancenot : si la population restait ce qu'elle est aujourd'hui on passerait de 45 à 49-51%.

Pour respecter les horaires convenus, M. J.M. Jancovici clôt la séance après avoir exprimé ses remerciements aux conférenciers au nom des participants et du groupe X-Environnement.

La réunion-débat organisée à la Maison des X a réuni une vingtaine de participants.

Le compte rendu, préparé par P. Malaval sur la base des notes prises en séance, d'un enregistrement et des documents remis par les conférenciers, a été corrigé par MM. Delécolle, Besancenot et Labre

B Note complémentaire de M. Besancenot

Examen de cas récents de recrudescence du paludisme

Lors de son exposé en séance, la brièveté du temps imparti, n'a pas permis à M. Besancenot de présenter son examen critique des différents cas de recrudescence du paludisme constatés ces dernières années. L'intérêt de l'analyse des causes justifie de compléter le compte rendu par une note qu'il a rédigé sur le sujet.

Au-dessus de 1.000 m sur les hautes terres malgaches, une épidémie meurtrière s'est développée en 1987 dans un secteur où le paludisme était éradiqué depuis 1962. Pourtant, la température n'a absolument pas varié durant ces vingt-cinq ans : l'explication la plus plausible fait intervenir la crise politique qui, en perturbant l'approvisionnement des centres de santé et des pharmacies, a entraîné l'arrêt des traitements de prophylaxie.

De même, une terrible épidémie a éclaté en 1994 au cœur du pays kiga, dans les montagnes du sud-ouest de l'Ouganda, autour de Kabale ; cette fois, il est indiscutable que la température a augmenté, mais si peu (de 0,4 à 0,6°C en trente ans) que les facteurs humains paraissent là encore avoir joué un rôle décisif : les effectifs de la population ont plus que triplé en moins de quarante ans et les papyrus qui occupaient les fonds de vallée ont été détruits ; or ils secrètent une huile essentielle qui forme un film à la surface de l'eau, empêchant la présence de moustiques...

On saisit là l'importance du nombre de gîtes larvaires, qui déterminent la taille des populations d'anophèles adultes et, par suite, le nombre de piqûres que sera susceptible de recevoir chaque habitant, donc le risque d'être affecté par le paludisme. Voilà qui montre à quel point on commet une grave erreur chaque fois que l'on isole la température des autres éléments, naturels ou anthropiques, susceptibles de conditionner la transmission d'une maladie...

Encore l'élévation thermique peut-elle aller de pair avec une baisse de la pluviosité, auquel cas les répercussions sanitaires risquent d'être à l'opposé du schéma attendu. Tel est depuis 1970 le cas de la région des Niayes, au nord de Dakar, qui a connu les sécheresses paroxystiques de 1972, 1983 et 1991. En dépit d'une hausse thermique de l'ordre de 0,5°C, le principal vecteur local du paludisme (ici *Anopheles Funestus*) a disparu avec les roselières, et la prévalence de cette parasitose a chuté de 50 à moins de 10%, sans que le retour à des précipitations « normales » en 1995 n'entraîne une réimplantation des moustiques.

La preuve est ainsi faite que le réchauffement climatique n'est pas – ou, à tout le moins pas encore – suffisant pour provoquer une recrudescence du paludisme en zone intertropicale, mais que la vigilance s'impose.

Un facteur supplémentaire d'incertitude tient au fait qu'à plus ou moins long terme, des mutations génétiques pourraient conduire à l'apparition de souches d'hématozoaires aux exigences écologiques différentes, un peu comme le plasmodium est devenu en bien des endroits résistant aux médicaments antipaludique les plus utilisés, à commencer par la chloroquine. Mais les recherches débutent à peine sur une éventuelle mutabilité des micro-organismes pathogènes, sous l'effet d'un changement climatique.