

Un système complexe : impacts et prévisions

Modélisations appliquées à la région méditerranéenne

Jean-Claude ANDRE

Gérard MEGIE :

Ce qui ressort de l'exposé de Katia Laval, c'est d'abord la complexité du système, je pense que vous l'avez tous appréhendé, mais c'est également que le climat ce n'est pas seulement la température, c'est aussi les précipitations, la sécheresse, la vapeur d'eau, et que donc cela va se décliner en termes d'impacts finalement sur les écosystèmes, sur les organisations sociales qu'on peut avoir et c'est ce dont traite l'exposé de Jean-Claude ANDRE. Il montre que même si la science a des incertitudes, on peut quand même dire des choses en terme d'impact et qu'en particulier s'occuper de régionalisation offre aujourd'hui des aspects importants.

Jean-Claude ANDRE :

Je vais essayer de franchir ce pas délicat dont Katia Laval a dit qu'il fallait le franchir avec prudence. Je vais m'efforcer d'indiquer ce que risque d'être le climat du siècle prochain et en particulier le climat pour nos régions.

Je voudrais rapidement aborder 4 points, c'est-à-dire revenir sur ce problème de régionalisation et vous montrer exactement quelles sont les armes dont on dispose pour essayer de progresser par rapport aux difficultés. J'utiliserai l'exemple du bassin méditerranéen pour vous montrer quelles sont les modifications climatiques qu'on peut attendre. Ensuite, je déclinerai de façon générale un grand nombre d'effets, soit directs, soit indirects, du changement climatique, avant de terminer par quelques éléments sur la façon dont ces choses se discutent au plan international.

La régionalisation est évidemment un point de passage obligé. Le problème quitte alors le monde scientifique pour rentrer dans le monde politique. La question qui est posée est le changement climatique : en quoi nous concerne-t-il, nous français, nous européens ? Il faut donc régionaliser ces changements climatiques. Et pour y parvenir, les incertitudes scientifiques s'interposent. D'un modèle à l'autre, il y a des variations. Il y a des paramètres qui sont extrêmement difficiles à prévoir parce qu'ils changent très rapidement d'un point du globe à l'autre, pratiquement tous les kilomètres ou dizaines de kilomètres. Les précipitations en sont un exemple. On rencontre aussi des limitations à caractère plus technique. C'est que nous ne disposons pas actuellement, même si la connaissance scientifique était suffisante, des outils techniques qui permettent de traduire cette connaissance scientifique en technique de prévision. Les modèles climatiques travaillent actuellement avec une résolution de l'ordre de 100, 200, 300 km, suivant que vous êtes dans l'océan ou dans l'atmosphère. Ces modèles ont été développés au maximum de ce qui pouvait tenir sur les ordinateurs les plus puissants disponibles à l'heure actuelle. Il y a une règle qui veut qu'à peu près tous les 7 ans la puissance des ordinateurs soit multipliée par 10. Attendons 14 ans. 10 fois 10, cela fait 100, donc en 2012 nous aurons des ordinateurs 100 fois plus puissants. Qu'en ferons-nous ? Comme il faut à peu près 50 heures de calcul pour simuler une année de climat, pour simuler 100 ans il faut 5000 heures de calculateur. 5000 heures, c'est presque une année de calculateur (une année fait 8000 heures). Donc vous voyez que si vous voulez simuler 100 ans de climat, ce qui est la moindre des choses pour savoir ce qu'il va se passer, c'est, à l'heure actuelle, pratiquement un an de calcul. Si on gagne un facteur 100 sur la puissance, on va utiliser un facteur 10 pour réduire ce temps. Il va alors nous rester un facteur 10 pour augmenter la finesse de description. Facteur 10, quand vous traduisez cela en taille, cela ne fait finalement qu'un facteur 2, parce qu'il y a 2 dans un sens, 2 dans un autre, 2 dans une troisième direction, et donc un facteur 10 en puissance, cela fait un facteur 2 sur la taille des structures que vous pouvez décrire.

Dans 14 ans, on disposera ainsi de modèles qui certes seront plus rapides, mais qui auront une résolution à peine plus fine. La limitation technique apparaît extrêmement forte. Pour essayer de dépasser cet obstacle, on peut se dire qu'après tout on va ne regarder de façon très fine que ce qui se passe au-dessus de notre tête et ne regarder que de façon beaucoup plus lâche ce qui se passe sur l'Atlantique, ou aux Amériques, ou dans l'hémisphère Sud parce que cela nous concerne moins. A procéder ainsi, on peut effectivement trouver des systèmes qui possèdent des résolutions très fines sur une zone restreinte et les "immerger" dans des modélisations plus lâches sur l'ensemble de la planète. On se heurte toutefois à ce moment là à un problème d'interaction entre ce que l'on décrit localement de façon fine et ce qu'on est obligé de décrire de façon globale et plus lâche, conduisant à nouveau à une limitation.

Ces problèmes se poseront face à nous pour de nombreuses années. Malgré cela, je vais vous montrer ce qu'on est capable de faire ou qu'on commence à faire à l'heure actuelle.

Nous allons prendre l'exemple du bassin méditerranéen au sens large (Afrique du Nord, Europe du Sud, Europe de l'Ouest) pour regarder ce qui se passe au niveau des changements climatiques à la fois sur la température, sur la précipitation (très rapidement puisque cela a déjà été présenté par Katia Laval) et sur l'eau disponible parce que dans le climat il y a des paramètres qui intéressent les climatologues parce que riches du point de vue de la thermodynamique du système mais l'eau présente le double avantage d'être un paramètre riche du point de vue de la thermodynamique du système mais aussi très important du point de vue de la vie. Nous passerons donc un peu plus de temps sur l'eau disponible.

Voici donc une simulation (**Figure 1 annexe II**) : rappelez-vous que si j'avais utilisé un autre modèle, d'autres hypothèses, j'aurais trouvé des résultats qui ne seraient pas superposables, mais qui auraient seulement quelques grands traits en commun. Vous reconnaissez le bassin méditerranéen avec l'Italie, la côte israélienne, l'Afrique du Nord, l'Espagne, la Grande-Bretagne. C'est une projection du réchauffement vers 2070. Pourquoi 2070 ? C'est à peu près la date à laquelle la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sera le double de ce qu'elle est aujourd'hui. C'est donc un bon rendez-vous pour comparer les prévisions des modèles climatiques. Voilà ce que sera ce réchauffement. Réchauffement de 2 à 3° sur la rive nord de la Méditerranée, un peu plus faible sur la rive sud et évidemment un réchauffement plus modéré sur la Méditerranée elle-même avec des réchauffements qui sont cette fois-ci de l'ordre du degré. Cela est valable pour l'été (les mois de juin, juillet, août). Le code de couleur utilisée pour la température est celui du

"plombier" : quand c'est chaud c'est rouge, quand c'est froid c'est bleu.

On peut présenter les résultats d'une simulation identique pour les mois d'hiver (**Figure 2 annexe II**). Cette fois-ci le schéma apparaît assez différent, parce que pour les mois d'hiver, comme vous voyez et, c'est, je crois, assez connu, le réchauffement augmente de façon très continu lorsque l'on va vers les latitudes les plus élevées, ici vers les latitudes les plus nordiques.

En 2070, nous sommes dans une gamme qui est de l'ordre du degré, mais qui peut atteindre quelques degrés (3, 4, 5 éventuellement) en allant vers la Scandinavie. On retiendra qu'à cette époque il n'y a pas de différenciation énorme entre les deux rives de la Méditerranée.

Voilà donc pour la température. Passons brièvement sur les précipitations. Avec, en quelque sorte, un dipôle entre la Méditerranée, sur laquelle les précipitations ont diminué, et la partie Europe du Nord sur laquelle les précipitations ont tendance à augmenter.

Cela est résumé sur une autre courbe (**Figures 3 et 4 annexe III**) qui donne le changement du taux de précipitation (le code de couleur est un peu différent de celui utilisé pour la température). Lorsque la couleur est dans les jaunes, cela veut dire que les précipitations diminuent, comme c'est le cas sur la Méditerranée. Quand elle est dans les bleus, cela veut dire qu'elles ont tendance à augmenter, comme c'est le cas sur l'Europe du Nord. On retrouve bien ce dipôle que de nombreux modèles visualisent.

Ce que je voudrais surtout vous montrer, c'est l'eau qui reste disponible dans le sol, parce que c'est finalement cette eau qui est utile pour ensuite alimenter la végétation, alimenter l'agriculture, éventuellement recharger les nappes, etc....

Les résultats : Je devrais qualifier ce que j'appelle quantité d'eau disponible : c'est la quantité d'eau qui est stockée dans la partie supérieure du sol, disons le mètre supérieur du sol, disons la couche qui est accessible aux racines de la végétation, essentiellement qui va servir à nourrir la végétation. Nous sommes en 2070 et nous nous posons la question de savoir si cette quantité d'eau disponible dans le sol a varié par rapport à ce qu'elle est aujourd'hui. Nous sommes en hiver 2070, et pour tout ce qui est colorié en rouge, la quantité d'eau dans le sol a diminué (**Figure 5 annexe IV**). Pourquoi a-t-elle diminué sur cette partie de l'Europe ? En hiver, nous avons vu que les précipitations diminuaient, donc que la recharge des couches supérieures du sol se faisait moins, et c'est probablement la raison qui explique cette diminution d'eau du sol. Heureusement, d'une certaine façon, comme cette modification de la pluviométrie n'était pas très marquée sur la rive sud de la

méditerranée, vous voyez qu'en fait la quantité d'eau dans le sol sur la rive sud de la Méditerranée, est d'après ces projections, peu affectée.

La quantité d'eau dans le sol en hiver n'est probablement pas aussi déterminante que la quantité d'eau disponible dans le sol en été (**Figure 6 annexe IV**). Et là, on constate toujours cette diminution qui se fait des deux côtés de la Méditerranée, parce que même si la précipitation d'été diminue moins, on a cette fois-ci une augmentation de la température qui fait que la végétation va avoir tendance à respirer, à fonctionner plus vite. Respirer plus vite c'est assécher plus vite ses ressources en eau. Donc finalement, que ce soit l'effet "température", ou l'effet "précipitation", cela joue malheureusement été comme hiver dans le même sens pour montrer que sur la rive nord de la Méditerranée, il faut à priori s'attendre à une diminution de la réserve en eau. Nous verrons tout à l'heure quelles conséquences cela peut avoir sur un certain nombre d'autres variables.

Je m'arrête ici pour la description de ce que risque d'être le climat méditerranéen au cours du siècle prochain. Je voudrais à présent passer quelques minutes sur la déclinaison d'un certain nombre d'impacts de ce changement climatique, qui peuvent être d'ores et déjà prévus.

Tout d'abord le niveau de la mer. Pourquoi le niveau de la mer ? Et bien tout simplement parce que l'océan est un très bon thermomètre puisque l'eau se dilate : si la température moyenne de la planète augmente, le niveau de la mer va monter. Il va monter pour à peu près la moitié de cette élévation à cause de la dilatation, du réchauffement, et pour une autre moitié à peu près par suite de la fonte des glaciers continentaux, voire de la calotte groënlandaise (ne faisons pas fondre l'Antarctique, à ces échelles de temps, l'Antarctique est très certainement stable !). Est-ce un effet que nous commençons à voir ? La réponse est oui.

Figure 7 (p. 20) : ces courbes pourraient être prolongées au moyen des données obtenues par d'autres systèmes de mesure. Je vous montre simplement ce qui se passe depuis 1993, depuis qu'il y a dans l'espace des moyens qui permettent de mesurer très directement le niveau de l'océan grâce aux satellites d'océanographie et d'altimétrie : ces satellites mesurent très précisément la distance entre eux-mêmes et la surface de l'océan. En regardant cette série de mesures, on voit le niveau de l'océan monter progressivement, depuis 1993, en fluctuant au cours de l'année. Ce que vous voyez c'est qu'en fait, à part l'année 97 qui est une année très particulière, le changement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre est un phénomène sur la durée, et que, de temps en temps,

il peut être accompagné d'un "accident climatique". Sur la durée, le niveau de la mer monte à un taux de l'ordre de 1 mm par an. De temps en temps surviennent des épisodes particuliers. On en a vécu un en 1997, épisode très intense, qui s'appellait El Nino. Il a fait la couverture de nombreux magazines, et cela a beaucoup attiré l'attention. Malheureusement, il a créé un certain nombre de perturbations à l'échelle planétaire. Ce phénomène El Nino, qui se caractérise par un Pacifique beaucoup plus chaud a conduit à accélérer le rythme d'élévation du niveau de la mer au cours de cette année 97 : la courbe en trait plein représente une bonne approximation du signal fluctuant et le taux est à peu près 10 fois plus fort. Ce qui est à peu près certain c'est que 98 présentera probablement quelque chose beaucoup plus proche du profil antérieur de la courbe.

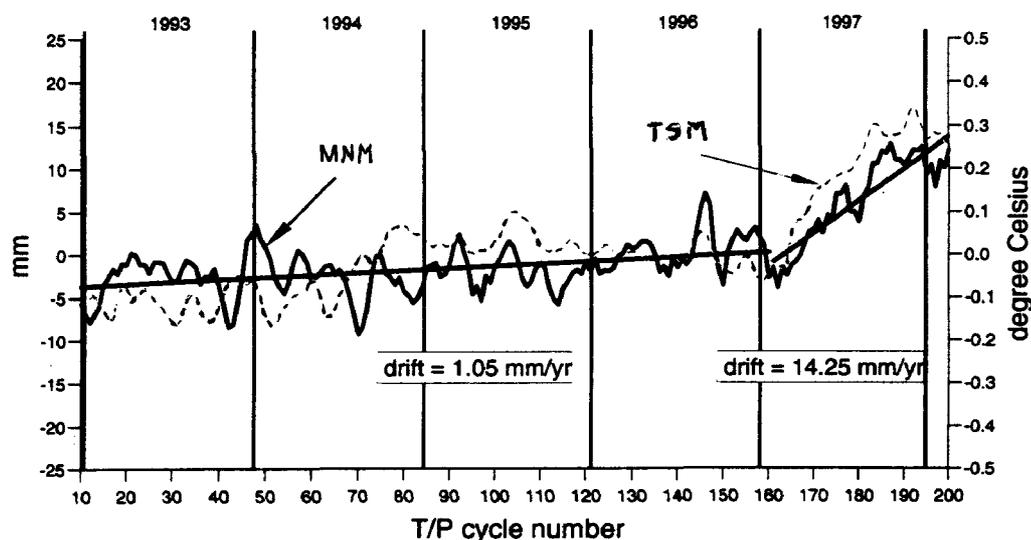


Figure 7 : Moyenne globale du niveau de la mer (MNM) et de la température à la surface de la mer (TSM)

L'augmentation du niveau de la mer est donc de 1 mm par an en gros; ce qui fait 1 cm par décennie, 10 cm par siècle. Le calcul n'est pas tout à fait aussi simple. Des modélisations prenant en compte à priori tous les phénomènes susceptibles d'être pris en compte montrent qu'à des horizons de 100 ans ou de 150 ans, les augmentations du niveau de la mer auquel on peut s'attendre sont dans la gamme des 20 cm. 20 cm pour nos régions, ce n'est pas quelque chose d'insupportable. Pour certains pays, en particulier les pays du Pacifique, atolls et rivages de très faible niveau au-dessus de l'océan, cela peut être particulièrement important et explique que dans les négociations internationales, les pays qui relèvent de cette catégorie se sont regroupés pour défendre spécifiquement leur point de vue.

Autre conséquence : Des montagnards sont présents dans l'assistance, je voudrais maintenant parler de l'enneigement en moyenne montagne, passant de phénomènes importants pour le climat à des phénomènes ayant des conséquences économiques. S'il fait plus chaud, que va devenir l'enneigement ?

Considérons cette simulation faite par des collègues grenoblois pour deux stations des Alpes (**Figure 8**). C'est une projection (aussi à l'horizon 2070, lorsque la quantité de gaz à effet de serre sera le double de ce qu'elle est aujourd'hui) du nombre de jours de neige à différentes altitudes (3000 m, 2700 m, 2400 m, 2100 m, etc... jusqu'à 900 m). En noir, ce qui se passe aujourd'hui. Aujourd'hui donc, à 3000 m, il y a en moyenne 16 jours enneigés dans la période du 15 au 30 avril. En blanc, ce qui se passerait dans un climat réchauffé. A très haute altitude, il n'y a pas de changement, il fait suffisamment froid pour que l'enneigement ne change pas. Par contre, que ce soit en fin de saison ou en début de saison, dans un cas fin décembre, dans l'autre fin avril, au fur et à mesure que l'on descend en altitude, bien évidemment le réchauffement climatique se fait sentir, et se fait sentir en faisant fondre d'autant plus vite la neige qui est dans un état un peu marginal. C'est très important et cela préoccupe peut-être plus les Pyrénéens peut-être que les gens des Alpes ; mais venant de Toulouse, je sais que c'est quelque chose qui commence à être préoccupant.

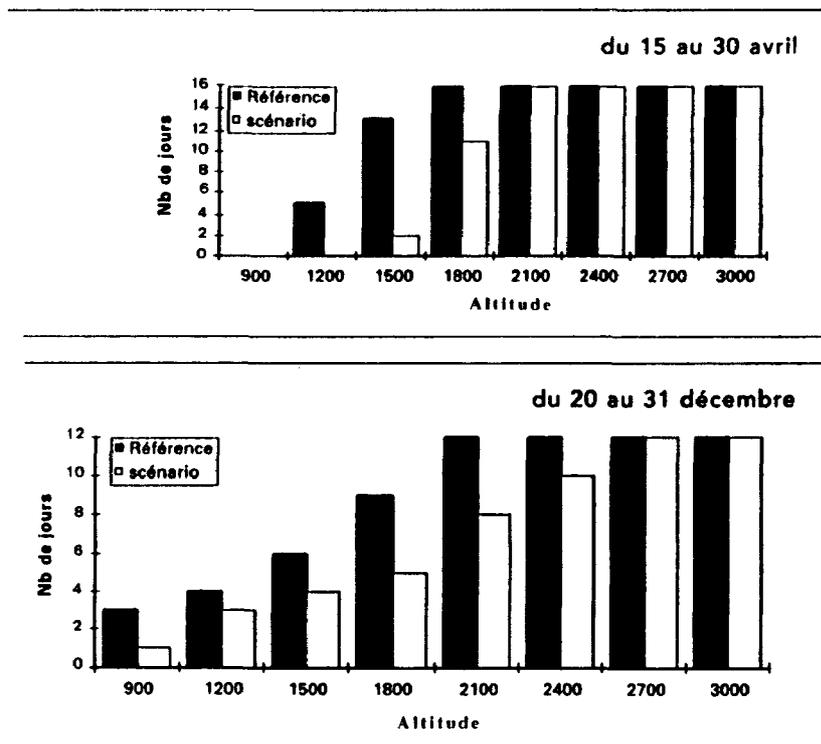


Figure 8 : simulation du nombre de jours de neige à différentes altitudes

Je continue à décliner un certain nombre de conséquences et d'impacts du changement climatique, maintenant avec la végétation naturelle. Katia Laval vous a dit "la quantité de gaz carbonique augmente dans l'atmosphère". Elle augmente d'une façon un peu curieuse, en tous cas dans l'hémisphère nord (**Figure 9**). Ici, c'est simplement un agrandissement sur la période 1980 - 1998, mais les mesures sont tout à fait identiques au point de vue qualitatif si l'on remonte au début du XXème siècle. Dans l'hémisphère nord, la courbe augmente en moyenne mais elle augmente avec des fluctuations qui sont très régulières et qui traduisent le cycle annuel de la végétation. Dans l'hémisphère nord, il y a beaucoup de continents, beaucoup de végétation, donc au moment de la croissance de la végétation (photosynthèse, absorption de gaz carbonique), on se trouve dans les phases descendantes. Par contre, en automne-hiver (sénescence de la végétation, etc...) on se trouve dans une phase où les émissions de carbone induisent les phases ascendantes de la courbe.

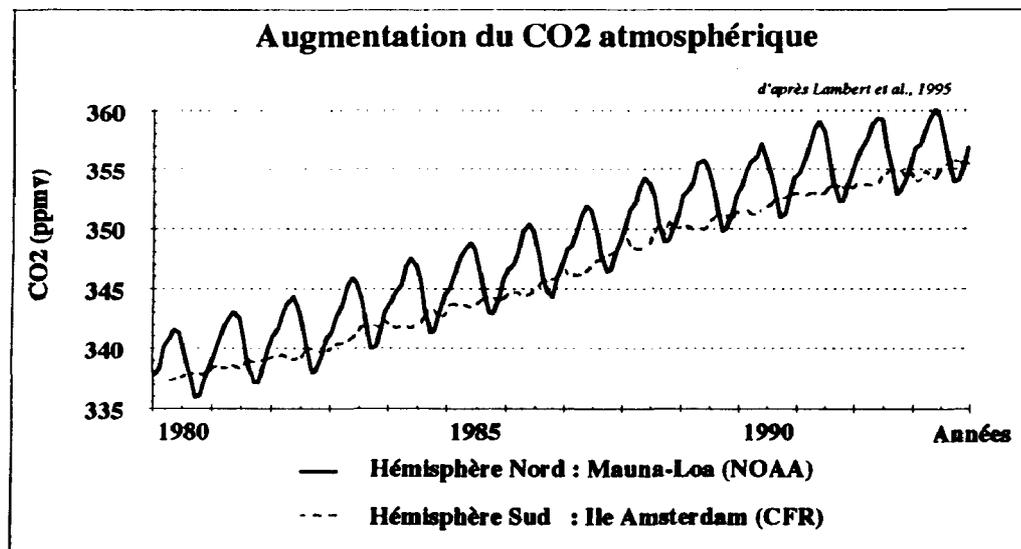


Figure 9

Constatant cela, on peut mesurer l'écart entre le point haut et le point bas, s'intéresser non plus à la moyenne de la courbe mais à l'amplitude entre ces deux points. On a ainsi une mesure de la quantité de végétation qui s'est développée et qui ensuite est entrée en sénescence. Si on fait cela, on s'aperçoit effectivement (évidemment on fait des choses un peu délicates dans la mesure où il s'agit de la différence entre deux valeurs qui sont elles-mêmes entachées d'incertitudes) que sur les dernières années cette courbe, l'amplitude année après année de la différence entre le point haut et le point bas, donc une mesure ou une estimation de l'intensité du cycle végétatif, a plutôt tendance à croître.

Cette croissance peut être mise en relation avec des mesures forestières auxquelles l'INRA procède depuis longtemps. Voici par exemple ce qui a été mesuré dans les Vosges, sur 4 espèces particulières : le sapin, l'épicéa, le hêtre et le chêne, sur des périodes qui sont des périodes séculaires (**Figure 10**). Le point à gauche est 1850, et à droite se trouve 1950. Cette courbe montre la croissance radiale de ces placettes d'étude. Peut-être que mesurer 4 espèces dans les Vosges n'est pas suffisant pour démontrer, mais en tous cas c'est un indice qui suggère que sous l'action progressive du réchauffement et de l'enrichissement en gaz carbonique, le cycle de la végétation s'accélère au cours du temps.

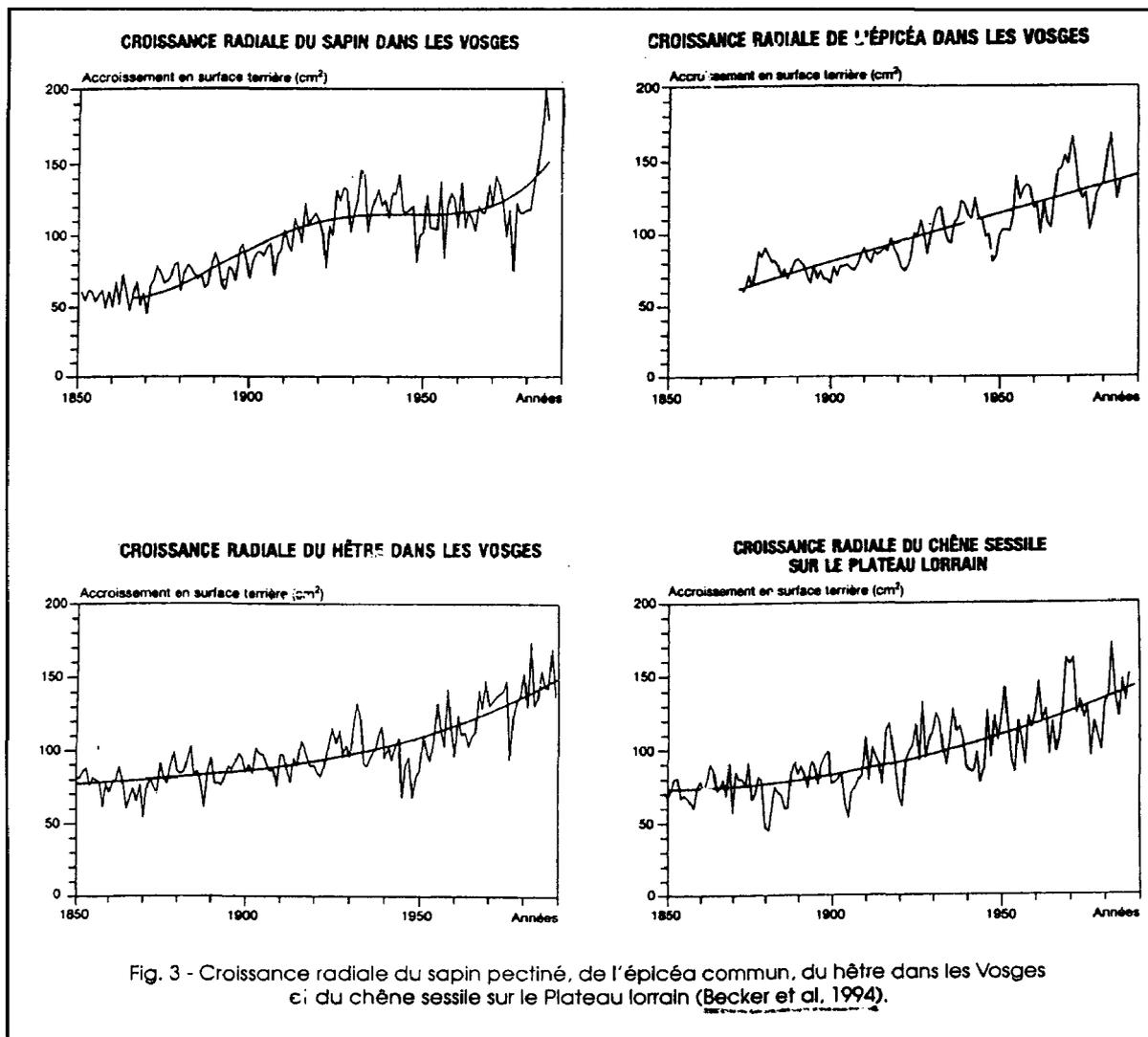


Figure 10 : effets spécifiques de l'augmentation du CO2 atmosphérique sur les arbres de la forêt

Si on essaie de résumer ce que risquent d'être du point de vue de la végétation naturelle les impacts de l'augmentation de l'effet de serre dans la zone intertropicale, étant donné qu'il y a énormément d'espèces et que l'eau n'est pas un facteur limitant, il y a peu de chance

que ces impacts soient sensibles sur la végétation naturelle. C'est simplement la déforestation, un phénomène différent, qui apparaît dans ces zones et qui va éventuellement injecter du carbone dans l'atmosphère. Dans la zone tempérée, on a pu parler d'une modification de la productivité plutôt dans le bon sens. Il y a une autre question qu'il faut se poser même si on ne peut lui apporter de réponse pour l'instant : les écosystémistes savent que les espèces arrivent à migrer naturellement à des vitesses de l'ordre de 50 km par siècle. Le changement climatique, on l'a vu plus haut, est sur l'Europe de 2° en 70 ans. Dans le climat actuel, pour trouver un point qui soit 2° plus chaud ou 2° plus froid, il faut aller 200 km ou 300 km vers le sud ou vers le nord. Le changement climatique va donc forcer les écosystèmes, qui se déplacent naturellement à une vitesse de 50 km par siècle, à migrer à une vitesse 3, 4, 5 fois plus importante. Question : cela sera-t-il possible ? Pour les zones de haute latitude, la végétation naturelle peut ressentir des effets positifs, c'est probablement les régions qui peuvent bénéficier de l'effet de serre. Considérant la scène internationale, on verra que a priori il peut y avoir des gagnants et des perdants dans l'effet de serre et que les hautes latitudes peuvent faire partie des gagnants.

Je voudrais enfin parler de production agricole. Il est très compliqué d'y faire des prévisions parce qu'il va y avoir une très forte interaction entre le changement climatique et les réactions du monde économique, sélection des semences, modification des pratiques culturales etc.... On peut simplement essayer de faire une prévision en se demandant, toutes choses égales par ailleurs : si le climat changeait, que se passerait-il ? Dans les zones intertropicales, la température n'est pas un facteur limitant, on a simplement des zones marginales extrêmement fragiles qui pourraient être affectées. Un point extrêmement important : c'est de savoir ce qui va se passer sur la rive sud de la Méditerranée. Il semble bien pour l'instant que les prévisions des modèles climatiques montrent que la pluviométrie hivernale n'est pas affectée. Si la pluviométrie hivernale devait être affectée, nous serions en phase d'impacts potentiellement forts, mais heureusement nous n'en sommes pas là.

Sur la zone tempérée, du point de vue de la production agricole, il y a à la fois des effets positifs et des effets négatifs. Le réchauffement a plutôt un effet positif pour le développement de l'agriculture. Par contre, l'augmentation des températures va provoquer une augmentation de l'évapotranspiration et de la respiration des plantes, une ponction plus importante dans les réserves en eau du sol et donc là, un effet négatif. Encore une fois on peut penser que les hautes latitudes sont l'endroit de la planète qui peut être gagnant dans le changement climatique, puisqu'on peut voir monter les cultures de blé d'hiver.

Un certain nombre de choses peuvent se passer et permettre de mettre en culture des zones qui jusqu'à présent l'étaient difficilement.

Quoiqu'il en soit, des modélisateurs ont essayé d'intégrer dans des modèles économiques macroscopiques ces différents facteurs climatiques en essayant de prévoir l'évolution de la production agricole, par exemple la production céréalière en million de tonnes MMT (million de tonnes métriques). (Figure 11) La courbe que nous montrons est empruntée à des collègues anglo-saxons. Dans le scénario de référence (2020, 2050, 2080) la production agricole croît. Toutes choses égales par ailleurs, dans le scénario avec changement climatique (2020, 2050, 2080) la production agricole décroît un peu.

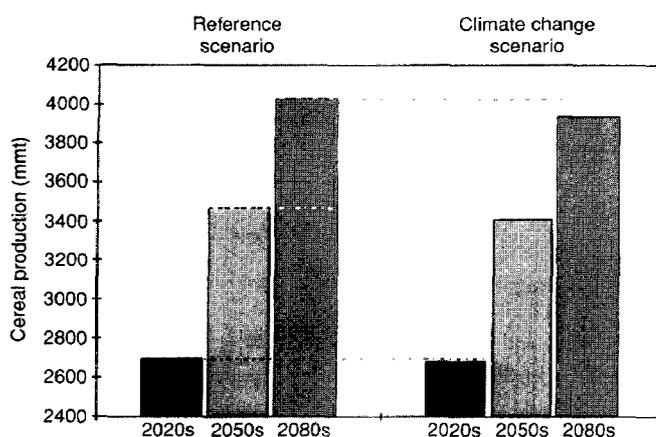


Figure 11 : Production céréalière (en mmt)

En traduisant cela en nombre de personnes qui peuvent éventuellement être affectées par la malnutrition, ces calculs macro-économiques donnent des chiffres qui sont de l'ordre de quelques dizaines de millions (je suis désolé d'employer ces unités de façon apparemment aussi légère). Des populations de 20 millions, 30 millions ou 40 millions d'habitants peuvent être exposées de façon plus marquée à la sous-alimentation (Figure 12).

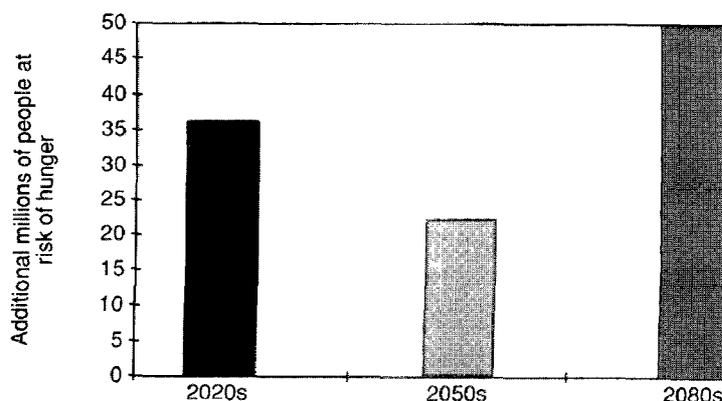


Figure 12 : Calcul du nombre de personnes affectées par la malnutrition (en dizaine de millions)

J'en terminerai par les ressources en eau. On en a déjà parlé. Une simulation avec des modèles macroscopiques (**Figure 13 annexe V**) montre sur ce planisphère l'année 2020, l'année 2050, l'année 2080 avec un codage de couleurs qui indique que lorsqu'on est dans des zones vertes, ce sont des endroits où la situation de la ressource en eau va en s'améliorant. On retrouve donc là évidemment ce que l'on a vu plus haut de façon un peu qualitative à propos des zones de hautes latitudes qui sont plutôt les gagnantes dans le changement climatique. Par contre, les zones jaunes et rouges sont les zones où le stress vis-à-vis de la ressource en eau risque d'augmenter et là, on trouve l'Europe de l'Ouest et une bonne partie de l'Afrique, en tous cas l'Afrique du Nord et puis évidemment le sous-continent indien. On est en droit de nourrir une certaine préoccupation.

Parlons des événements extrêmes. C'est difficile. On ne sait pas prévoir, ou très mal prévoir, les événements extrêmes dans le climat actuel. Prévoir les événements extrêmes dans un climat changeant est encore un peu plus difficile. On peut faire des raisonnements très simples : on sait que la température seuil à partir de laquelle les cyclones tropicaux se déclenchent est de 27°, à quelques dixièmes près. Dans un climat réchauffé, soit la température de l'océan dans son ensemble sera plus élevée, soit les parties de l'océan dont la température dépasse la température seuil seront plus étendues. Dans un cas comme dans l'autre, cela invite à prévoir une augmentation du nombre de cyclones tropicaux. On peut le contester. Je dois dire que des chercheurs ont fait des calculs de ce type et ont conclu qu'il n'y avait pas d'effets.

Reste un impact moins spécifique sur lequel je voudrais brièvement dire deux mots : c'est celui sur la santé. Parce que beaucoup d'éléments de la santé sont liés aux conditions climatiques, on peut essayer de se projeter dans l'avenir et réfléchir à l'impact du réchauffement.

Les effets directs ne sont pas extrêmement nombreux. Avec un réchauffement des températures hivernales on enregistre une baisse de la mortalité ou de la morbidité hivernale. Avec une augmentation de la température estivale une augmentation de cette mortalité. Si il se produit davantage d'événements extrêmes, inondations, etc.... cela a des conséquences. C'est plutôt sur les effets indirects que les préoccupations sont les plus marquées à l'heure actuelle : les effets indirects, parce que la modification du régime thermique, la modification du régime hydrique, vont changer les zones dans lesquelles un certain nombre de vecteurs de maladies se développent, et cela peut donc avoir des conséquences pour la malaria ou d'autres maladies. S'il y a des impacts sur la production agricole, cela va avoir des conséquences immédiatement sur la nutrition ou la

malnutrition. Si des modifications de circulations océaniques se produisent, c'est un peu au même type de raisonnement qu'il faut recourir. Les zones de remontées d'eau froide se révèlent extrêmement riches du point de vue de la productivité biologique, elles risquent d'être affectées, et par voie de conséquence les ressources liées à la pêche risquent d'être perturbées. Ce sont des effets indirects. Probablement l'effet lié au changement des zones des maladies à vecteur est l'effet qui actuellement retient le plus l'attention, même s'il est encore difficile à quantifier.

Voilà pour les effets. J'ai essayé de vous décrire un panorama où tous les effets ne sont pas forcément négatifs. Il y a quelques gagnants dans le jeu du changement climatique. Je voudrais simplement terminer en parlant de la façon dont toutes ces notions sont passées du monde scientifique aux mondes socio-économique et politique. J'ai essayé de vous donner quelques éléments. Cela passe maintenant entre les mains du monde politique puisque le changement climatique a été reconnu comme une menace pour l'humanité : la négociation internationale s'en est donc emparée. Quels sont les enjeux du débat ? Tout d'abord, nous sommes face à un problème de robinet et de baignoire. Nous avons une baignoire, l'atmosphère, pleine non pas d'eau mais de gaz à effet de serre. Ce n'est pas en coupant le robinet (les émissions, les usines ou les transports, etc...) que l'on peut d'un seul coup vider la baignoire. Les gaz à effet de serre sont un problème que nous avons pour pas mal de temps. Les durées de vie de ces gaz dans l'atmosphère (**tableau 1**), sont de l'ordre du siècle pour le gaz carbonique, ou de quelques décennies pour les gaz qui disparaissent plus vite. Nous sommes devant un problème qui va perdurer. Les mesures que nous prenons maintenant qui consistent à fermer un peu le robinet ne vont pas faire sentir leurs effets tout de suite. Par contre, il y a des robinets qui vont avoir tendance à s'ouvrir.

DUREE DE VIE DES GAZ A EFFET DE SERRE	
• Dioxyde de carbone	200 ans
• Méthane	10 ans
• CFC	100 ans
• Oxyde nitreux	150 ans
• Substituts des CFC	1 - 15 ans
• ozone	quelques mois

Tableau 1

Ce transparent présente un tableau (**tableau 2**) . Je ne l'ai pas remis à jour mais je pense que les chiffres n'ont que peu varié. Voici rapportée au nombre d'habitants de ces différents pays la consommation en carbone. Si vous êtes américain, vous consommez 5 tonnes de carbone par an et vous avez un niveau qui est celui que vous connaissez. Si vous êtes un russe, vous en consommez pratiquement autant. Aujourd'hui vous en consommez un peu moins et cela reste un élément du problème. Si vous êtes un européen ou un japonais, vous consommez deux fois moins qu'un américain sans forcément avoir un niveau de vie 2 fois inférieur. Et si vous habitez le tiers-monde ou le quart-monde, en Chine, en Indonésie ou ailleurs, vous consommez 0,3 tonne par an. C'est très directement lié au sous-développement. Les enjeux de la négociation internationale sont donc clairs. Les pays actuellement responsables des émissions des gaz à effet de serre sont les pays développés où la consommation de carbone par tête d'habitant est forte. Ils doivent faire un effort, doivent donner l'exemple. Un problème demeure qui constitue une bombe à retardement importante : si le monde réussit à résoudre le problème du sous-développement, les consommations de carbone par habitant dans ces pays vont augmenter, à moins de trouver des méthodes de développement qui leur permettent de se développer sans augmenter la consommation énergétique, méthodes qui n'existent pas vraiment à ce jour. En fait, l'effet de serre d'aujourd'hui n'a pas les mêmes responsables que l'effet de serre de demain et tout bien considéré, l'effet de serre de demain pourra être largement aussi important que l'effet de serre d'aujourd'hui.

Emissions de carbone en tonnes par habitant et par année	
USA	5,4
USSR	5,0
EC	2,4
Japan	2,4
China/Indonesia/India	0,3
Germany	3,4
The Netherlands	3,3
United Kingdom	2,9
France	2,0
Italy	1,8
Spain	1,4

Tableau 2

C'est là toute la problématique nord-sud dans les discussions de Kyoto, Buenos-Aires, etc... On a parcouru un grand chemin depuis le problème climatique exploré en théorie tel que nous l'a exposé Katia Laval jusqu'au problème politique tel qu'il se pose dans ces forums. Les scientifiques ont réussi à sensibiliser l'opinion internationale, à faire passer le problème dans le monde politique. Désormais la résolution du problème dans le monde politique dépend certes des progrès que pourront réaliser les scientifiques mais dépend aussi de nombreux autres facteurs qui sont hors du monde de la physique et des sciences dures.

Jean-Claude ANDRE
Directeur du CERFACS

enregistrement du débat *

Gérard MEGIE

Je pense qu'on va pouvoir maintenant ouvrir le débat.

Pour répondre à Monsieur Dausset sur le plan de est-ce qu'il y a vraiment une controverse ou non ? Je crois que ce qu'a défini Katia Laval et ce qu'a exposé Jean-Claude André, montrent bien qu'en fait, il y a encore de très nombreuses incertitudes sur la compréhension du système climatique. Ceci dit c'est vrai qu'on est aujourd'hui dans une phase où la réalité du changement climatique devient d'une certaine façon de plus en plus évidente, de plus en plus tangible. On a vu que là on parlait de 2070, c'est-à-dire de 3 générations avec des augmentations de température, des variations d'humidité et que donc, c'est vrai que le problème s'est un petit peu déplacé aujourd'hui du forum scientifique où il continue d'alimenter l'avancée des connaissances (heureusement pour nous) vers le problème économique et le problème politique.

* *N.B. : S'agissant d'un enregistrement nous avons choisi de conserver la spontanéité de l'expression verbale qui avec ses redites, ses approximations, ses reprises, caractérise un dialogue vivant.*

Enfin, je pense que ce qui est intéressant c'est de voir si effectivement vous avez des réactions, des questions que vous voulez poser ou bien si vous êtes sous le choc de ce qui va nous arriver dans les 30 ou 40 ans qui viennent.

Question (Anne de CORLIEU LAVAU) : Je suis une Béotienne au point de vue scientifique. Je suis devant deux problèmes, deux questions à poser, d'abord le plan bleu qui prévoit en 2025 une Méditerranée avec un avenir "pays stérile", une "mer stérile" et qui aura augmenté de volume et c'est déjà fait, serait ravitaillée en bateaux céréaliers et en bateaux citernes, c'est déjà fait aussi pour les Iles Baléares (le Canal de Provence alimente Majorque). Et sur vos cartes en effet, tout le Bassin Méditerranéen qui fut le berceau paraît très menacé et le plan bleu s'est-il basé également sur la climatologie ? Ensuite nous avons remarqué, nous autres riverains de la Méditerranée, qu'elle a nettement augmenté d'un mètre, c'est fait ! Et nous l'avons remarqué à cause des bornes qui délimitent le domaine public en certains endroits. Maintenant on voit 20 cm de la borne qui faisait plus de 1 m. Voilà les questions que je pose !

Jean-Claude ANDRE : Je ne sais pas si je peux répondre à la totalité de votre question. Sur la partie est-ce que les projections climatiques ont fait partie des études du plan bleu ? Je le pense. Je vais vous montrer quelque chose que je n'ai pas montré tout à l'heure, un travail fait par des collègues méditerranéens qui montrent sur la période actuelle, ce qui corrobore ce que vous dites, la variation de la salinité en Méditerranée, la variation de la température en Méditerranée. Ce n'est pas la salinité globale de la Méditerranée, ni la température globale de la Méditerranée, mais cela montre bien qu'effectivement la Méditerranée se réchauffe, se salinise. Je n'ai pas montré les résultats des mesures altimétriques par rapport au niveau de la Méditerranée mais il y a là un signal très fort en Méditerranée qui est plus fort en moyenne que le signal global. Donc, même en étant Béotienne on peut avoir des éléments de réflexion je crois avérés.

Jean DAUSSET : D'abord je voulais vous remercier et vous féliciter et vous poser quelques questions. La première c'est que mon impression générale est que vous êtes plus optimiste qu'on ne le lit dans les journaux à sensation. Tant mieux, vous êtes vraiment des vrais scientifiques, merci ! Et deuxièmement je vois que vous considérez les événements que nous connaissons tous, les cyclones, les inondations au Guatemala, etc... comme un accident qui devrait ne pas se reproduire et qui n'a pas de rapport avec le réchauffement. Est-ce que c'est vrai ? Est-ce que vous en faites un accident qui ne se reproduira pas ou bien est-ce que c'est lié au réchauffement ?

Jean-Claude ANDRE : Merci. D'abord un petit clin d'oeil , s'il suffisait de pondérer l'optimisme et le pessimisme pour être un bon scientifique(rires)... Simplement l'esprit scientifique effectivement vous amène à ne pas verser trop rapidement dans un excès.

Les événements extrêmes. Encore une fois quand je vous ai présenté ce que l'on pouvait imaginer quant à la fréquence des cyclones à venir, je vous ai présenté un résultat qui va, je dirai, dans le sens commun qui est de dire que ce nombre d'événements extrêmes devrait augmenter. J'ai modéré en disant que certaines études qui impliquaient des rétroactions beaucoup plus globales à travers la modification de la circulation océanique, c'est-à-dire la grande cheminée équatoriale, montraient que finalement cela n'augmentera peut-être pas. Il est donc peut-être un peu prématuré de prévoir que le nombre d'événements extrêmes va aller en augmentant. Ce qui est sûr c'est que si la distribution moyenne de température glisse vers les températures chaudes, le nombre d'épisodes anormalement chauds va lui-même selon toute vraisemblance être plus important. Mais ce sont des raisonnements au premier degré et je crois que nous manquons cruellement pour l'instant d'éléments scientifiques qui permettent d'aller au-delà de ces raisonnements au premier degré.

Katia LAVAL : Je voudrais dire un mot qui va un peu dans le même sens. C'est là la difficulté que nous avons face aux mesures. Quand vous faites le compte des cyclones dans ces régions, vous en trouvez une année 3, une autre année 2, une autre année 5. Est-ce que le 5 est un effet climatique ou est-ce que le 5 est une fluctuation ? En Atlantique on a dénombré l'année dernière énormément de cyclones. Est-ce qu'on peut l'attribuer aux changements climatiques ? On ne peut pas le dire aujourd'hui sans avoir par l'observation plus de mesures. Etant donné que le nombre de cyclones n'est pas constant chaque année, on ne sait pas si la fluctuation correspond à ce qu'on appelle le chaos, la turbulence, le manque de prévisions de ce phénomène ou est-ce que c'est dû vraiment au changement climatique. Il en faut un peu plus que ce qui s'est passé l'année dernière (1997) pour en décider. Je le dis comme cela.

Gérard MEGIE : Assurément d'autant que l'année dernière était déjà une année fortement perturbée sur le plan climatique par l'événement El Nino.

Jean DAUSSET : Quand vous dites aussi que la mer Méditerranée va monter d'un millimètre, est-ce que c'est compatible avec ce que l'on sait, c'est-à-dire qu'il y avait des différences de mètres de l'ordre de 3, 4, 5 m : la preuve, cette grotte qu'on a trouvé récemment. Est-on dans cet ordre de grandeur ?

Jean-Claude ANDRÉ : Oui tout à fait , c'est dans l'ordre de grandeur sans l'être. Mais ce sont des phénomènes compatibles. Les grandes variations auxquelles vous faites allusion sont liées à des alternances glaciaires, interglaciaires qui mettent en jeu des fontes de masse de glace qui sont infiniment supérieures à celles qui seront mises en jeu dans le "petit" mais très significatif réchauffement climatique que nous connaissons.

A quelle vitesse cela allait-il ? On connaît l'excursion à travers un certain nombre de traces. Sur quelle durée cette excursion s'est-elle faite, là les réponses ne sont pas encore tout à fait précises. Il semble qu'il y ait de temps en temps des événements dans le paléoclimat qui se soient déroulés de façon rapide, quelques centaines d'années mais je ne sais pas répondre sur le cas précis de la montée en Méditerranée. A priori toutefois, cela se serait passé sur des périodes plus longues, me semble t-il.

Question dans le public : Est-ce qu'on a une idée de l'impact sur le phénomène El Nino d'un réchauffement de la température ?

Jean-claude ANDRE : Des idées on en a ! La question c'est : sont-elles bonnes ? Si vous considérez El Nino comme une espèce de soupape de sécurité dans le système climatique qui absorbe de l'énergie puis qui de temps en temps relâche cette soupape, vous êtes conduit à penser que le nombre d'événements El Nino , soit par leur intensité soit par leur nombre, risquent de croître. Effectivement, un de nos collègues américains argumente que le nombre d'événements El Nino et leur intensité est en train d'augmenter. Et là, je rejoins tout à fait ce qu'a dit Katia Laval, la référence pour poser cette observation est cruellement courte et cela doit être gardé en mémoire. Si le sens commun n'est pas incompatible avec cette augmentation cela reste encore une fois complètement à démontrer.

Gérard MEGIE : la seule certitude qu'on peut avoir, c'est que cet épisode est probablement le El Nino du siècle parce que le changement de siècle maintenant étant devant nous on rentrera dans une autre mesure objective de ce genre d'épisodes.

Question dans le public : j'ai beaucoup apprécié la clarté de vos deux exposés et ma question est la suivante : les modèles que vous avez présentés ce sont des modèles physiques qui incluent généralement les gaz à effet de serre. Vous nous avez parlé beaucoup du CO2, de la vapeur d'eau ; j'imagine qu'ils incluent le méthane et autres gaz, mais ces modèles incluent-ils la variation de la masse végétale ? Je vous pose cette question parce que j'ai été très intéressé par la petite intervention que vous avez faite sur la variation rapide de la

masse végétale. J'aimerais d'abord une réponse à cette question et ensuite votre opinion est-elle que cela peut jouer ou ne pas jouer à l'échelle de temps que nous considérons, c'est-à-dire 20 ou 50 ans ?

Katia LAVAL : A l'heure actuelle nos modèles n'incluent pas la masse végétale. Nos modèles représentent les échanges de l'atmosphère avec la végétation, l'évaporation, la pluie qui reste sur la végétation, la pluie interceptée qui est capable d'évaporer, ou la transpiration à travers les racines mais on ne représente pas la masse végétale et son évolution. Ce que l'on fait, ce qui est en chemin, ce qui bouge beaucoup, c'est d'inclure l'évolution de l'évaporation. On a des modèles simples mais dans un modèle de circulation générale, des modèles locaux verticaux où on essaie de mettre en oeuvre toutes les phases de la végétation avec la sénescence et le développement de la végétation mais cela n'est pas inclus dans les modèles. Cela fait partie des grands projets où il entre beaucoup d'interdisciplinarité. A l'Institut Simon Laplace, on a un projet dans ce sens et on doit avancer pas à pas parce que le problème, encore une fois, est complexe. On va faire des choses simples puis voir si les choses simples que l'on fait sur des modèles locaux vont pouvoir marcher sur ces grands modèles. C'est une chose importante.

La deuxième question que vous avez posée est importante : est-ce que ceci va avoir des effets sur le CO_2 et est-ce qu'il y a une réaction en retour sur le climat ? L'idée généralement acceptée c'est que en présence de plus de CO_2 la végétation se développe plus, et donc vous allez avoir un effet sur le CO_2 puisqu'il y aura plus de végétation qui entrera en jeu. Donc encore une fois, des modèles d'écologistes ont travaillé un peu sur cela en travaillant sur «quand on augmente le CO_2 , comment change la production agricole» ? Nous ce qu'il faudra qu'on fasse dans nos modèles - dans le futur des 10 années à venir -, c'est quand on y introduit la production agricole et que l'on change ainsi de manière continue le CO_2 , quel est l'effet en retour sur les variations de CO_2 .

On franchit une étape de plus dans la complexité des choses sur lesquelles les chercheurs travaillent avec des systèmes simples pour l'instant mais qui sont dans l'avenir des systèmes que l'on va inclure dans des systèmes plus élaborés.

Gérard MEGIE : je voudrais rajouter un mot sur ce que vous avez dit : est-ce qu'on prend bien en compte tous les gaz à effet de serre, toutes les possibilités ? Là encore, on a aussi des couplages nouveaux à faire. Par exemple on sait très bien que l'ozone troposphérique qui est en train d'augmenter est un gaz à effet de serre. C'est un gaz

d'autant plus intéressant qu'il n'augmente pas de la même façon dans les deux hémisphères avec le forçage radiatif qui va faire intervenir les constantes de temps qui sont en jeu ne seront pas les mêmes. Un des autres axes de développement c'est tout ce couplage entre la réactivité chimique de l'atmosphère et le problème de l'effet de serre. Cela va jouer aussi sur la réponse par exemple de la masse végétale. On sait que l'augmentation de l'ozone et l'augmentation des oxydants jouent sur certaines espèces de façon négative par rapport au CO². En plus, quand vous avez l'effet synergique des deux en même temps, ce n'est pas la somme des deux effets. Toutes ces difficultés, toutes ces non-linéarités qu'on introduit de plus en plus, cela demande du temps, cela demande de coupler tous ces aspects et c'est effectivement quelque chose de difficile.

question dans le public : une question un peu marginale, c'est le fait que vous avez parlé d'une échelle spatiale pour le phénomène, et il y a des phénomènes qui sont de la taille de cette échelle, je pense à 3 points : l'éruption volcanique comme le Pinatubo, la désertification ou la déforestation, et troisième point qui en résulte, l'épandage du pétrole sur les océans avec le changement de l'échange mer / atmosphère. Je crois que ces points sont à une échelle telle qu'ils vont finir par pouvoir être pris en compte. Or il risque d'y avoir une influence irréversible sur l'évolution future, comment pourrez-vous faire apparaître les précautions à prendre pour qu'on ne tombe pas dans ce type d'irréversibilité ?

Jean-Claude ANDRE : sur les volcans, vous avez vu que nous sommes dans des problèmes de prévision, donc nous cherchons à savoir ce qui va se passer dans les décennies à venir. Le modèle de prévision volcanique n'existe pas. Ceci étant, s'il y a une éruption volcanique majeure (vous avez parlé du Pinatubo), a-t-elle une influence climatique ? La réponse est clairement oui. Et on voit très bien dans la courbe de montée de la température moyenne de la planète, on voit très bien après l'éruption du Pinatubo un accident qui a duré 3 ans à peu près. On sait qu'effectivement c'est le temps qui est mis par les aérosols qui sont injectés dans la haute atmosphère, la stratosphère, c'est le temps qu'il faut pour que ces aérosols, ces particules, soient lessivés et retombent au sol. Donc une éruption volcanique va avoir un effet climatique pendant 3 ans. En l'occurrence cet effet climatique est un effet de refroidissement. Imaginez qu'on sache prévoir les éruptions volcaniques et qu'on sache prévoir des éruptions volcaniques tous les 3 ans, le réchauffement global disparaîtrait. Par contre, on est face à une situation dans laquelle on ne peut constater que l'éruption volcanique qui a eu lieu et quand elle a eu lieu. Il y a eu des prévisions qui ont été faites après le Pinatubo sur la température

moyenne de la planète pendant les quelques années qui suivaient cette éruption et qui se sont avérées extrêmement fiables et précises. Donc la réponse est clairement oui.

La déforestation : je vais laisser Katia Laval parler des changements de climat qui peuvent être induits par exemple par une déforestation amazonienne ou indonésienne. La déforestation a un effet majeur : c'est l'injection de carbone dans l'atmosphère parce que les résidus de la déforestation vont se décomposer et c'est du carbone qui in fine va passer dans l'atmosphère. On n'a pas donné de chiffres tout à l'heure mais il y a à peu près 6 milliards de tonnes de carbone qui vont dans l'atmosphère chaque année par combustion du pétrole, du charbon, etc... 1/3 du carbone envoyé dans l'atmosphère ou 1/4 (2/8) l'est à cause de la déforestation. Donc la déforestation contribue à l'enrichissement en gaz à effet de serre. Maintenant quel effet a t-elle sur le climat lui-même plus direct, peut-être que Katia Laval peut commenter ?

Katia LAVAL : Ce que l'on sait faire, c'est d'une part des observations. Il y a eu des campagnes de mesure en Amazonie qui ont montré un certain nombre de résultats partiels, locaux obtenus par des mesures en un point, ou en trois points pour la campagne qui a coûté très chère, et il y a des campagnes à venir qui vont nous fournir beaucoup plus d'observations. D'autre part, ce qu'on sait faire, c'est faire tourner des modèles en changeant la végétation, en changeant les paramètres que l'on a. Pour avoir un signal suffisamment clair par rapport à cette variabilité climatique parce que d'une année sur l'autre les résultats des modèles sont différents à cause des fluctuations et des perturbations dues simplement aux dépressions qui passent et qui arrivent, on doit faire une déforestation majeure. Donc la modélisation que l'on fait de la déforestation c'est de faire une déforestation de toute l'Amazonie dans les modèles. Très dernièrement on a fait une déforestation partielle qui enlevait 50% de la végétation de l'Amazonie.

Les résultats, c'est qu'on trouve des effets significatifs et le premier effet très clair et compréhensible c'est la variation d'évaporation. Vous avez moins de végétation, vous allez moins chercher l'eau dans le sol loin et donc il y a moins d'évaporation. Donc, vous jouez sur le cycle hydrologique et vous jouez un peu sur la température, surtout sur les contrastes aujourd'hui mais vous jouez surtout sur le cycle hydrologique en diminuant l'évaporation.

Ce qui est complexe et intéressant et que l'on a pas encore vérifié par les mesures parce qu'on a pas assez de mesures, c'est que dans des zones internes, intérieures de l'Amazonie, ce manque d'évaporation va donner une diminution de précipitations mais vous avez des contrastes thermiques au bord des régions côtières entre les continents et les océans qui

vont exagérer les vents thermiques, les brises marines si vous voulez, et qui peuvent donner localement dans certaines régions plus de pluie. Donc on trouve des effets tangibles sur une déforestation majeure, modélisée par un modèle. On a trouvé sur les variations entre l'hiver et l'été des campagnes de mesures sur un local qui n'était pas déforesté et un endroit qui était déforesté sur une région assez grande de quelques km² qu'il y avait des changements d'évaporation, qu'il y avait des changements de température. Les changements de précipitation, on n'en est pas sûr parce que la période n'est pas assez longue pour être sûr du résultat, pour savoir si le résultat, entre - 0,1 et + 0,1 mm est significatif.

Gérard MEGIE : je ne suis pas compétent sur les nappes de pétrole et autres, mais il me semble que cela se rapproche assez de choses sur lesquelles on travaille aussi qui est par exemple, quelle est l'influence à grande échelle de l'îlot thermique créé par les grandes agglomérations ou de certaines plages de polluants des agglomérations qui supposent effectivement une certaine imbrication et une modélisation d'abord du phénomène de pollution lui-même puis son imbrication dans les plus grands modèles.

Je voudrais dire une chose sur les éruptions volcaniques et autres phénomènes, Katia Laval disait tout à l'heure qu'on ne peut pas faire de vraie expérience dans l'atmosphère. C'est vrai mais un phénomène comme l'éruption du Pinatubo, c'est d'une certaine façon une expérience en vraie grandeur dans laquelle on change un certain nombre de conditions dans l'atmosphère et qui nous permet d'étudier précisément sous l'effet d'une perturbation soudaine un certain nombre des processus qu'on a élaborés. C'est vrai au niveau de la troposphère, ça a été vrai au niveau de la stratosphère et du problème de l'ozone. On a appris beaucoup de choses grâce à ce phénomène qui heureusement trois ans après est revenu à la normale.

question dans le public : dans votre modélisation mathématique vous faites un maillage à priori. Est-ce que quelquefois vous pouvez avoir un maillage automatique pour affiner en fonction des gradients de température ou de pression ?

Jean-Claude ANDRE : on ne fait pas cela de façon adaptative comme le font par exemple les aérodynamiciens qui en fonction de la position d'une onde de choc sur une aile vont aller affiner le maillage et suivre ; cela on ne sait pas le faire. Mais par contre, il y a des techniques maintenant qui existent pour avoir des modèles à mailles variables qui

permettent une fois pour toutes de décider qu'on va concentrer la résolution sur tel ou tel point. Il y a plusieurs méthodes. Il y en a certaines qui sont développées dans le laboratoire de Katia Laval, d'autres qui sont développées à Météo France. Il y a des techniques qui existent maintenant pour concentrer la résolution sur des zones d'intérêt que l'on choisit à priori. Mais on n'a pas actuellement au niveau de la modélisation climatique ou météorologique la croissante résolution adaptative qui suit les phénomènes. On en ressent pas véritablement le besoin mais les techniques existent dans d'autres disciplines de simulation.

intervention dans le public : et donc le calcul est quand même directement lié au nombre de noeuds que vous avez dans votre maillage ?

Jean-Claude ANDRE : Tout à fait, c'est pour cela que quand on veut faire du climat régional, on va essayer de concentrer les points sur les endroits qui nous intéressent.

question dans le public : Est-ce qu'on n'a pas une hypothèse en ce qui concerne le niveau par exemple de la Méditerranée, on a trouvé cette grotte sous-marine, est-ce qu'on peut supposer qu'au lieu d'avoir le niveau qui a augmenté, est-ce que ce n'est pas le massif qui à la suite de tremblements de terre se soit affaissé ? Le résultat serait peut-être le même en ce qui concerne la grotte : était-elle sous-marine ou était-elle au-dessus et le massif s'est-il effondré ? On a eu il y a quelques années tout un pan, une énorme partie je crois de l'aéroport de Nice qui s'est effondré dans la mer, il y a aussi l'érosion qui sur des périodes très longues doit avoir des effets en ce qui concerne des descentes de matière vers le fond de la mer.

Gérard MEGIE : Alors là je pense qu'on sort un peu de notre domaine de compétence. Je pense que de toute façon s'il y avait effectivement une rupture tectonique et autre, on en retrouverait la trace dans l'étude finalement des signatures tectoniques géologiques à ces endroits là. D'un autre côté la fluctuation du niveau de la mer de 80 m entre les périodes glaciaires et les périodes inter-glaciaires, c'est quelque chose qu'on appréhende bien et qu'on mesure bien.

question dans le public : une question qui montre mon ignorance totale de ces choses là, je ne comprends pas, les périodes glaciaires par exemple ont du être vécues par les habitants comme des catastrophes écologiques invraisemblables. Elles se sont étalées sur des centaines d'années. Ils n'ont pas attribué cela à l'action de l'homme tout de même ?

Gérard MEGIE : non, non

suite de la question : Bon, alors que nous nous vivons une époque véritablement apocalyptique et prométhéenne, nous voyons l'homme comme responsable à 20 ans à 30 ans de catastrophes prochaines qui autrefois s'étalaient sur des centaines d'années. Je vois le Sahara par exemple s'est désertifié mais pas depuis 50 ans, depuis 3 000 ans, 4 000 ans, 5 000 ans, l'homme n'agissait pas à ce moment là . Quelles étaient les raisons, pourquoi ces périodes glaciaires ?

Gérard MEGIE : les raisons des fluctuations climatiques sont parfaitement connues, pour partie si on raisonne sur des centaines de milliers d'années, elles sont liées clairement aux variations du rayonnement qui est reçu du soleil et qui est lié aux fluctuations d'orbite de la terre. C'est un problème de mécanique céleste à l'intérieur du système solaire. On sait depuis Laplace qu'il y a des périodicités à 20.000, 40.000 ans qui font que de faibles variations de la quantité d'énergie qu'on reçoit du soleil amènent automatiquement des fluctuations de température. Et ces périodicités sont maintenant bien établies sur des cycles de 250.000 grâce aux observations qu'on a pu faire dans les archives de la terre en particulier au pôle sud.

Quand vous dites "on vit aujourd'hui une époque terrible", je crois que c'est l'inverse. On vit aujourd'hui d'abord dans un optimum climatique. On vit également, si vous "discutez" avec des gens qui ont vécu le crétacé tertiaire où les extinctions massives des espèces à certains moments, on vit vraiment dans une période tout à fait calme de l'histoire de la planète terre. Les grandes éruptions volcaniques du décan ou les chutes de météorites, pour l'instant, on n'a pas encore connu cela.

Je crois que le vrai problème est un problème d'adaptation et de temps d'adaptation par rapport à la perturbation qu'on est en train de donner au système. Quand on parle des grandes variations climatiques, d'abord il y avait moins de monde et c'était quand même plus facile à la limite de se déplacer depuis certains territoires vers d'autres. Aujourd'hui, cela devient un peu plus délicat. Et d'autre part, cela se passait sur des constantes de temps qui se chiffraient plutôt en centaines ou en milliers d'années. Là on est en train d'appliquer une perturbation au système avec des vitesses qui sont de l'ordre de la décennie.

Pour moi l'enjeu de cette affaire est simple : si vous demandez si la planète terre va retrouver un équilibre après ces fluctuations climatiques qu'on est en train de lui imposer

depuis l'ozone, etc..., ma réponse est oui, le système est suffisamment stable pour retrouver un équilibre. La seule question à laquelle je ne sais pas répondre, c'est si nous on fait partie ou non du nouvel équilibre. C'est exactement le même problème que les dinosaures et un certain nombre d'espèces qui ont disparu à un moment donné. Il y en a d'autres qui ont survécu. Donc le système survivra, peut-être sans nous à ce moment là.

Jean DAUSSET : une dernière question. Est qu'on est en période de réchauffement indépendamment de l'homme et quel est le pourcentage d'impact de l'homme dans ce que vous nous avez décrit ? Question importante parce que là nous sommes en train de vivre quelque chose qui peut influencer nos enfants et les générations futures, est-ce que c'est nous les responsables ?

Jean-Claude ANDRE : Gérard MEGIE a rappelé que nous étions dans un optimum climatique, que la terre connaissait des perturbations d'orbite. Si on fait de la mécanique céleste, on sait qu'on va aller très doucement dans une période théoriquement de glaciation. Quand vous regardez les alternances glaciation/déglaciation Il faut qu'on parle du calendrier. vous pouvez courir dans un métro à l'arrêt, vous pouvez être arrêté dans un métro qui court, enfin..... il faut composer les vitesses. On est dans une période d'optimum climatique. S'il n'y avait pas d'autres perturbations dans 80.000 ans, on serait au maximum d'une période glaciaire et probablement une période de déglaciation beaucoup plus rapide qui, au lieu de mettre 80.000 ans, ne mettrait peut-être que 10.000 ans suivrait. Nous sommes sur une pente très douce qui nous ramène, alors quand va t-elle commencer ? Sommes-nous arrivés en haut de l'optimum climatique ? Avons-nous à nous réchauffer encore un petit peu de façon naturelle ou sommes-nous déjà sur le sommet ? Ou sommes-nous déjà en train de descendre ? Je crois que personne ne s'aventurera à faire ce pronostic. Nous sommes sur des échelles de temps qui sont la centaine de milliers d'années pour la totalité ainsi que le glaciaire. Sans autres perturbations du système, nous devons théoriquement sur quelques dizaines de milliers d'années, retourner vers du glaciaire. Maintenant, l'homme est en train de modifier à l'échelle de 100 ans de façon radicale et plus importante, les conditions. Nous avons une perturbation qui se joue sur des décennies contre une perturbation lente qui se joue sur des dizaines de milliers d'années. Il y a un facteur 1000 entre les échelles de temps humaines et les échelles de temps naturelles. Cela se justifie qu'on se préoccupe prioritairement de l'échelle de temps courte.

débat

Jean DAUSSET : Donc vraiment la responsabilité de l'homme est considérable à l'heure actuelle. Donc on a raison à mon avis de tirer la sonnette d'alarme et il semble que les politiciens ne répondent pas aussi vite qu'on le souhaiterait. C'est un problème extrêmement difficile.

Messieurs, je vous remercie.



**Différences entre un climat à 2 CO₂ et le climat actuel
(avec températures de surface océanique du Hadley Center)**

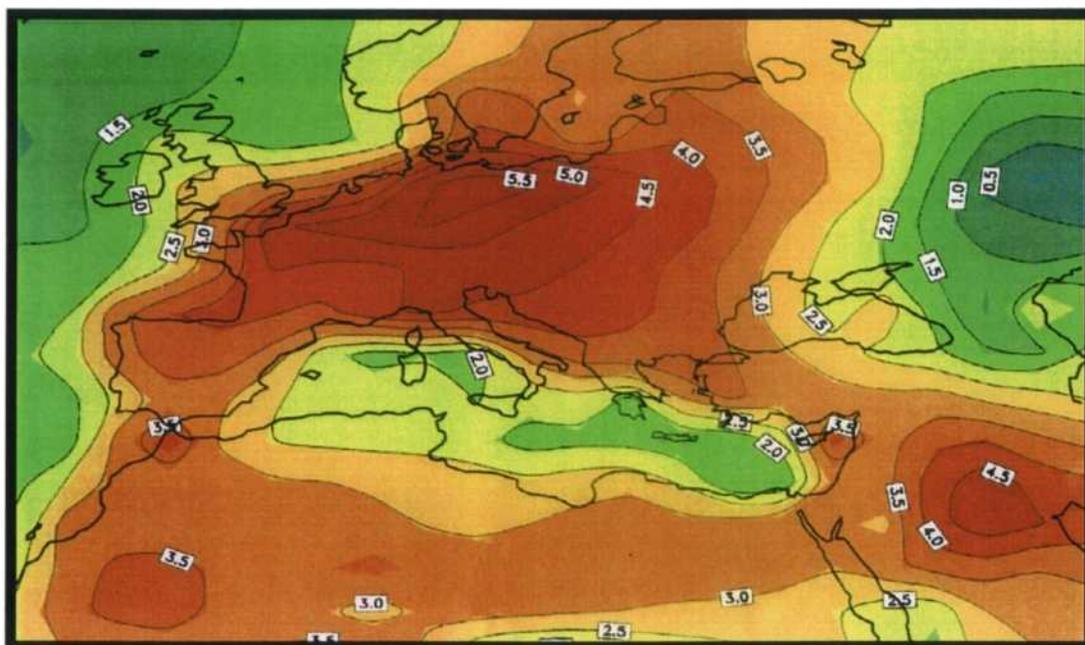


Figure 1 : Anomalies des températures.
(Mois de Juin, Juillet et Août)

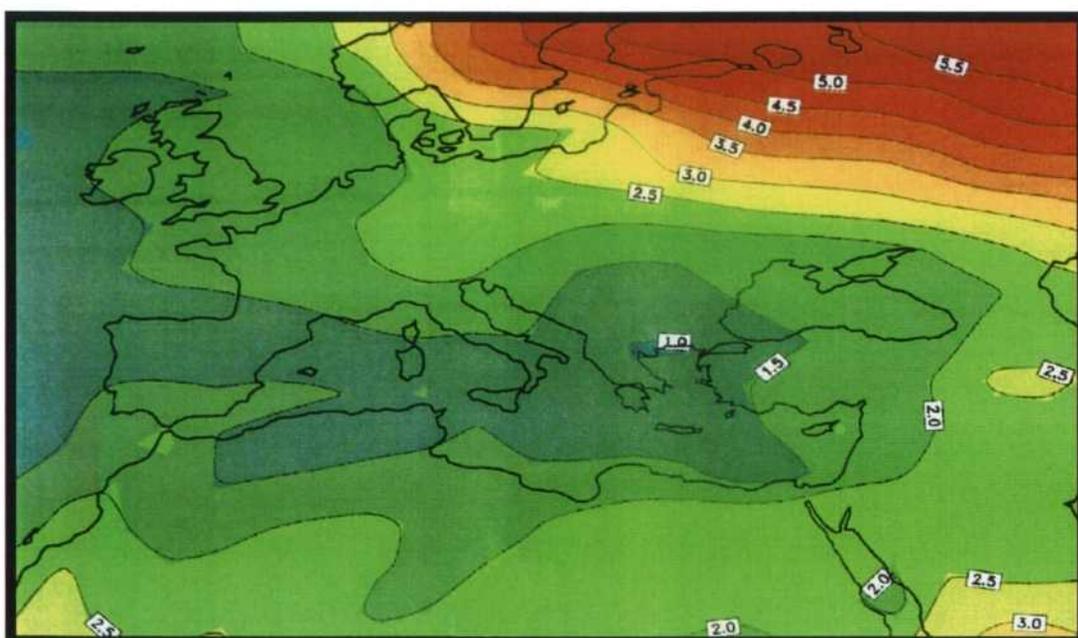


Figure 2 : Anomalies des températures.
(Mois de Décembre, Janvier et Février)

**Différences entre un climat à 2 CO₂ et le climat actuel
(avec températures de surface océanique du Hadley Center)**

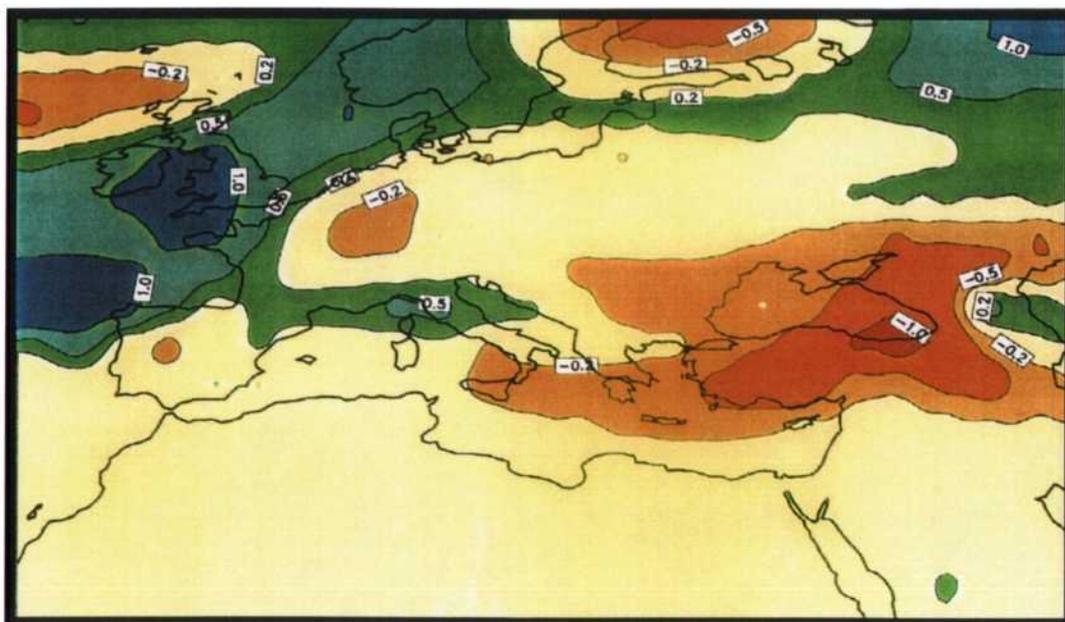


Figure 3 : Anomalies des précipitations.
(Mois de Décembre, Janvier et Février)

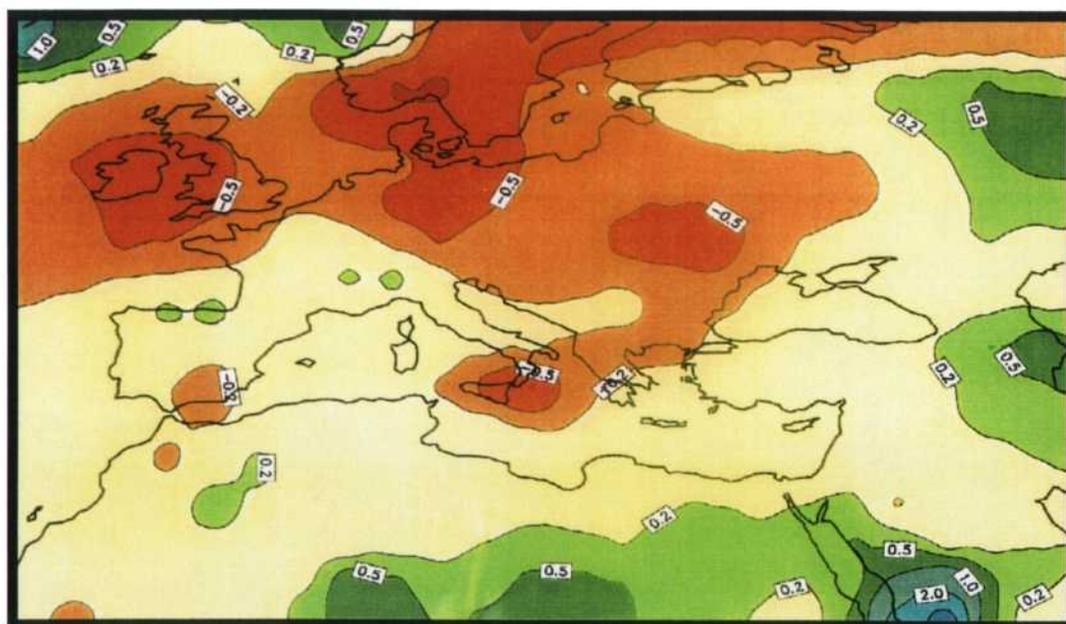


Figure 4 : Anomalies des précipitations.
(Mois de Juin, Juillet et Août)

**Différences entre un climat à 2 CO₂ et le climat actuel
(avec températures de surface océanique du Hadley Center)**

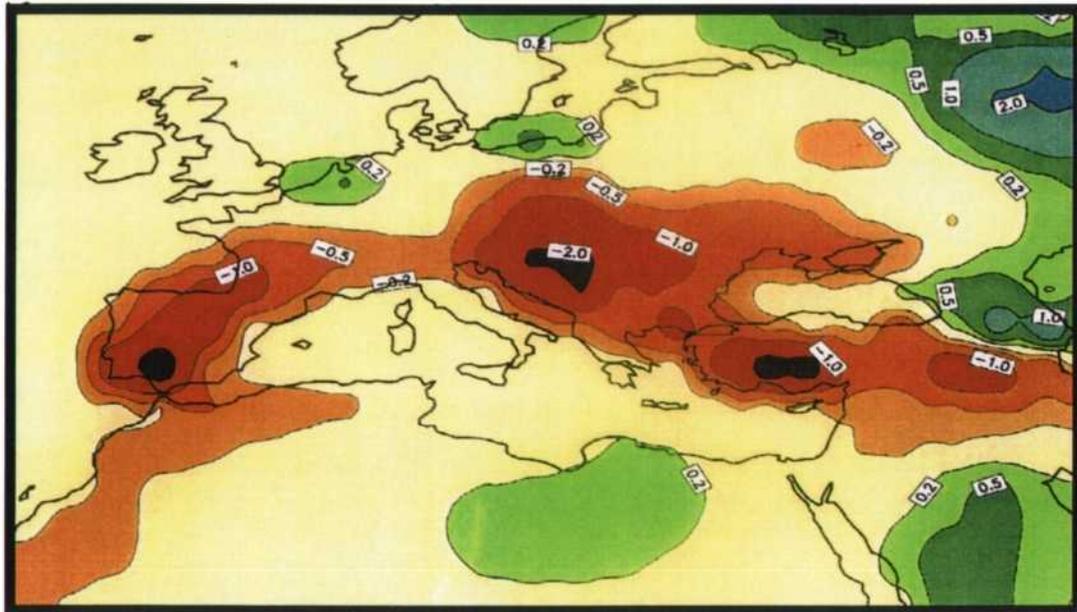


Figure 5 : Anomalies de la quantité d'eau disponible dans le sol.
(Mois de Décembre, Janvier et Février)

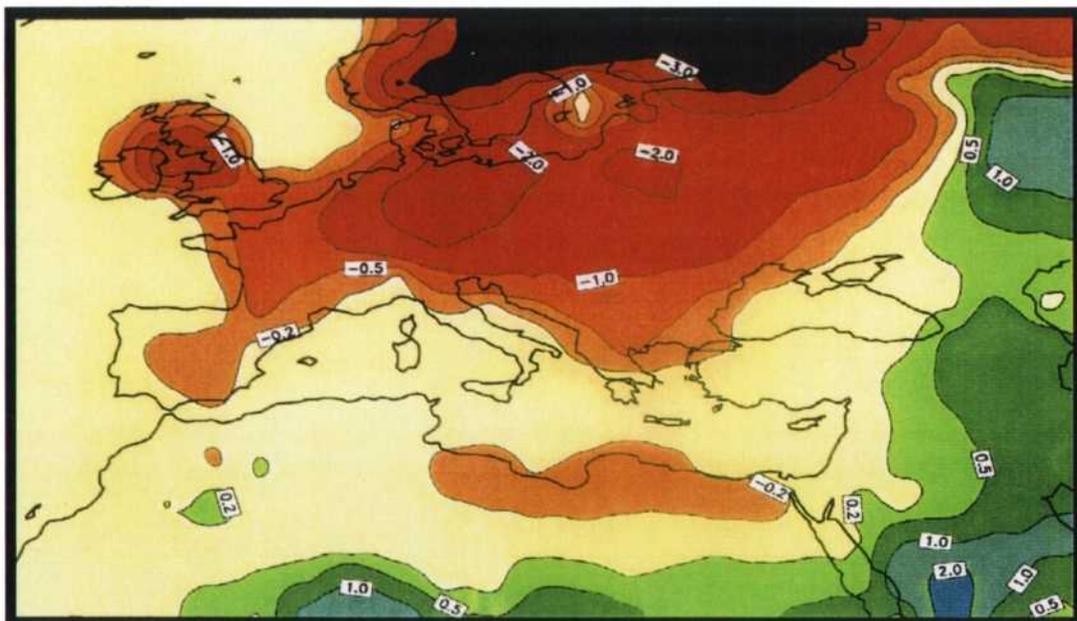
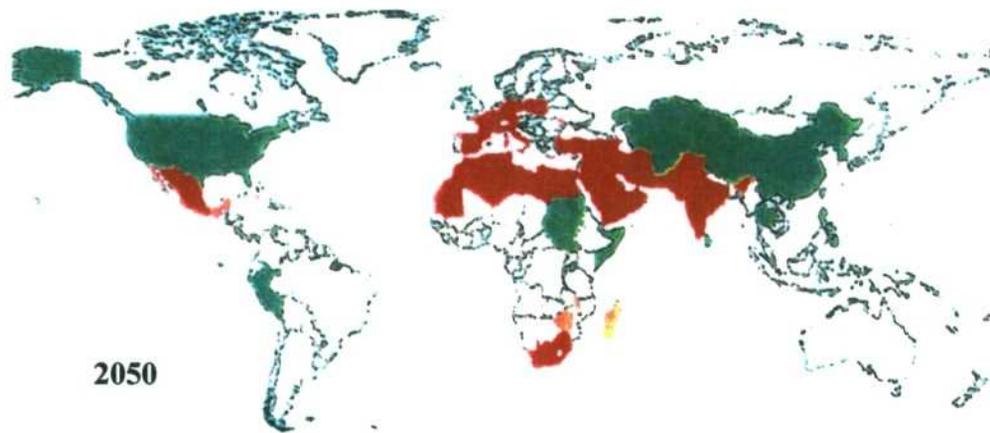
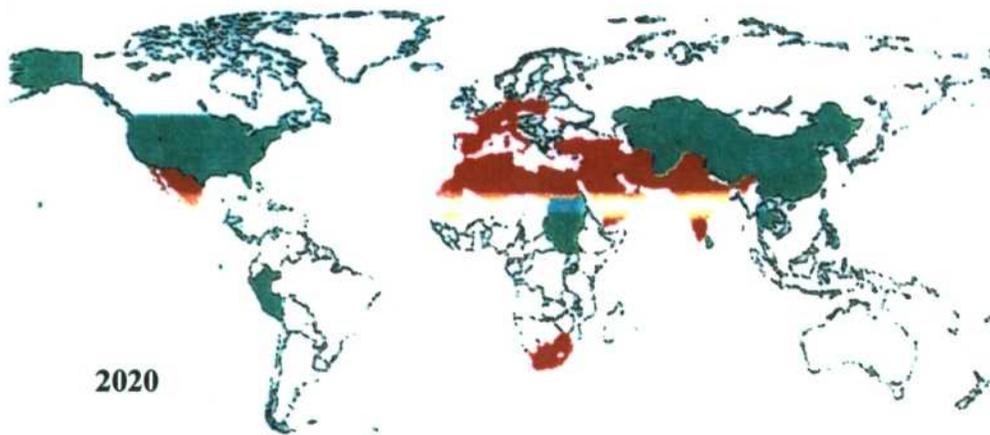


Figure 6 : Anomalies de la quantité d'eau disponible dans le sol.
(Mois de Juin, Juillet et Août)



- : Sed country with increase in stress.
- : Country move to stressed class.
- : Stressed country with decrease in stress.