

## Les projections

**Depuis une vingtaine d'années, la littérature scientifique abonde en chiffres et cartes nous présentant des futurs possibles pour le climat de la planète. Parmi les résultats des différents modèles, un coup de projecteur sur les chiffres et tendances dégagés à partir de la contribution française à l'effort international de modélisation : pour le globe dans son ensemble, pour quelques régions, puis pour l'Europe et, enfin, l'hexagone. En gardant à l'esprit qu'il ne s'agit pas de prévisions mais qu'il est permis d'espérer que l'éventail de modèles toujours plus complexes cernera mieux demain la véritable réponse du système climatique.**

par Michel DÉQUÉ, *Météo-France, Centre national de recherches météorologiques*

La certitude que le climat de la planète s'est réchauffé au cours du XX<sup>e</sup> siècle et, aussi, la possibilité de calculer les caractéristiques du climat à partir d'une distribution spatiale et temporelle de concentration des agents radiativement actifs dans l'atmosphère (gaz à effet de serre et aérosols) grâce aux modèles numériques ont conduit la communauté scientifique à proposer des scénarios pour les cent prochaines années. (Voir l'article de Serge Planton).

Depuis une vingtaine d'années, la littérature scientifique abonde en chiffres et en cartes nous présentant des futurs possibles pour le climat de la planète. Les quatre rapports successifs du groupe de travail 1 du Giec ont fait, à intervalle régulier, une synthèse exhaustive des résultats de centaines de chercheurs utilisant des dizaines de modèles du système océanique et atmosphérique. Le rôle de cet article n'est pas de tenter un résumé du dernier rapport sorti en ce début d'année. Il en existe d'ailleurs un, excellent, traduit en français, à l'intention des décideurs. Il se propose plutôt d'en illustrer et commenter certains résultats, essentiellement à partir de la contribution française à l'effort international de modélisation. En effet, la plupart des études d'impact quantitatives sur notre pays se sont faites, et se feront, à travers des collaborations multidisciplinaires à l'échelle nationale. Nous examinerons successivement les résultats sur le globe dans son ensemble, puis nous donnerons quelques détails sur diverses régions du monde avant de nous concentrer sur l'Europe et finalement sur la France métropolitaine. En guise de conclusion, nous proposerons une chronologie du réchauffement sur ces trois domaines au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Le rapport du Giec abonde en références bibliographiques et nous ferons, ici, l'impasse sur cet aspect.

### Le réchauffement de la planète

Le mot projection, choisi pour qualifier les résultats des modèles pour les prochaines décennies, a un sens bien précis. En dépit d'un malentendu courant, il ne s'agit pas de prévision. La première raison en est que le futur que

décrivent les modèles est un futur que l'on souhaite éviter. La deuxième, c'est qu'une prévision n'a valeur scientifique que si elle est vérifiable. La bonne question est donc : « si la concentration en dioxyde de carbone atteint telle valeur, que devient la température du globe ? ». Personne ne peut dire quelle sera cette concentration dans cent ans. Nous avons donc recours à des scénarios divers, allant du minimum au maximum. C'est là notre source première d'incertitude. Dans son dernier rapport le Giec propose six scénarios, baptisés B1, A1T, B2, A1B, A2 et A1FI, du plus faible au plus fort en termes de réponse globale de la température à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Il évalue également le scénario, calculable mais très improbable, d'une concentration constante au niveau de l'année 2000. Ces six scénarios ne se voient pas affecter de coefficient de probabilité, preuve supplémentaire qu'on n'est pas face à un processus de prévision.

L'élévation moyenne estimée de la température du globe à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (par rapport à la fin du XX<sup>e</sup>) va de 1,8°C pour le scénario B1 à 4°C pour le scénario A1FI. Un écart considérable si on le compare à l'élévation de 0,6°C observée au cours du siècle dernier. Le choix de la plage haute ou basse est laissé à l'humanité pour les vingt à quarante prochaines années ; ce n'est pas une incertitude scientifique. Nous avons fait, ici, le choix de nous restreindre au scénario médian A1B pour ne pas noyer le lecteur sous les chiffres. Ce scénario propose un réchauffement de 2,8°C. De nombreuses distributions de probabilités ayant leur densité maximale proche de la médiane (la loi de Gauss, par exemple) on a tendance à conjecturer que ce scénario médian est aussi le plus probable, sous réserve de l'absence de mesures de réduction des émissions au niveau mondial.

Le choix de se restreindre à un scénario ne nous met pas à l'abri des incertitudes. En effet, les modèles numériques ne sont qu'une approximation grossière de l'extrême complexité des phénomènes qui régissent le climat. Le choix des méthodes d'approximation est fort heureusement très divers parmi les modèles, ce qui conduit à une diversité de réponses, et donc à une nouvelle source d'incertitude. Pour

le scénario A1B, la fourchette se situe entre 1,7°C et 4,4°C d'après le dernier rapport du Giec, ce qui est finalement du même ordre que l'incertitude liée au choix du scénario. Il faut bien avoir à l'esprit que cet intervalle traduit l'incertitude due au choix d'un modèle particulier et non une incertitude de prévision. Rien ne prouve scientifiquement que si le scénario A1B se réalise le réchauffement observé se situera dans cet intervalle. C'est pourquoi les scientifiques préfèrent utiliser le terme de dispersion plutôt que celui d'incertitude, comme ils emploient projection plutôt que prévision. Si tous les modélisateurs cherchaient à se copier les uns les autres plutôt qu'à innover par la diversité des approches, on aurait un intervalle plus étroit. Ce phénomène d'innovation explique pourquoi la largeur de l'intervalle ne diminue pas d'un rapport du Giec à l'autre. Elle n'a aucune raison de diminuer dans l'avenir, contrairement à une opinion répandue, car les progrès des moyens de calcul et de la physique du climat vont permettre de prendre en compte de nouvelles rétroactions négligées jusqu'à présent. Cette prise en compte se fera dans la diversité des approches individuelles. Ce qu'on peut espérer, en revanche, est que l'éventail de modèles toujours plus complexes cernera mieux la véritable réponse du système climatique.

### Le projet Escrime

Pour des raisons essentiellement historiques, la France bénéficie de deux modèles de climat, celui du CNRS, géré par l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), l'autre, issu du modèle de prévision de Météo-France, étant utilisé par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM). Ces deux modèles ont en commun la partie océanique et le calcul du transfert radiatif, mais suivent des approches radicalement différentes pour des composantes qui comportent une grande part d'incertitude (nuages, cycle hydrologique, sol-végétation, banquise, dynamique de l'atmosphère libre). Cette richesse nous permet d'aborder la question des incertitudes au niveau national. Le but du projet Escrime est de produire les mêmes expériences que celles demandées par le Giec (certaines sont obligatoires, d'autres sont optionnelles), de mettre en commun les sorties des deux modèles, et de mener en parallèle des études d'analyse des résultats.

La figure 1 permet d'aller un peu plus loin que les chiffres bruts globaux indiqués plus haut. On y voit que le réchauffement est plus marqué sur les continents (jusqu'à 4°C) et plus fort au pôle nord (jusqu'à 6°C) en raison de la disparition de la banquise arctique. Le scénario du CNRM montre un refroidissement au sud du Groenland lié au ralentissement de la circulation océanique nord-sud. Ce phénomène a inspiré un film à grand spectacle il y a quelques années et alimente aujourd'hui une peur non fondée de voir la Bretagne prise par les glaces. La figure 2 illustre l'impact sur les précipitations. Comme indiqué plus haut, le signe de la réponse n'est pas uniforme. Sur l'Europe et l'Amérique centrale on constate une diminution, tandis que les pluies augmentent sur l'équateur. Sur d'autres régions, comme le Sahel ou l'Inde, les deux modèles ne présentent pas le même comportement.

La question des cyclones tropicaux est souvent mise en avant depuis l'épisode du cyclone Katrina qui a détruit la Nouvelle-Orléans. Il convient d'être très prudent car les modèles de climat n'ont pas la résolution suffisante pour représenter complètement ces phénomènes, et il n'existe pas de preuve forte que leur fréquence se soit renforcée au cours du XX<sup>e</sup> siècle. Il est probable que certaines régions vont les voir augmenter et d'autres diminuer, sans qu'on puisse encore dire lesquelles et quel sera l'effet net sur le globe. La seule chose que nous apprennent les modèles est que les cyclones de la fin du XXI<sup>e</sup> siècle seront plus précipitants que ceux que nous connaissons actuellement.

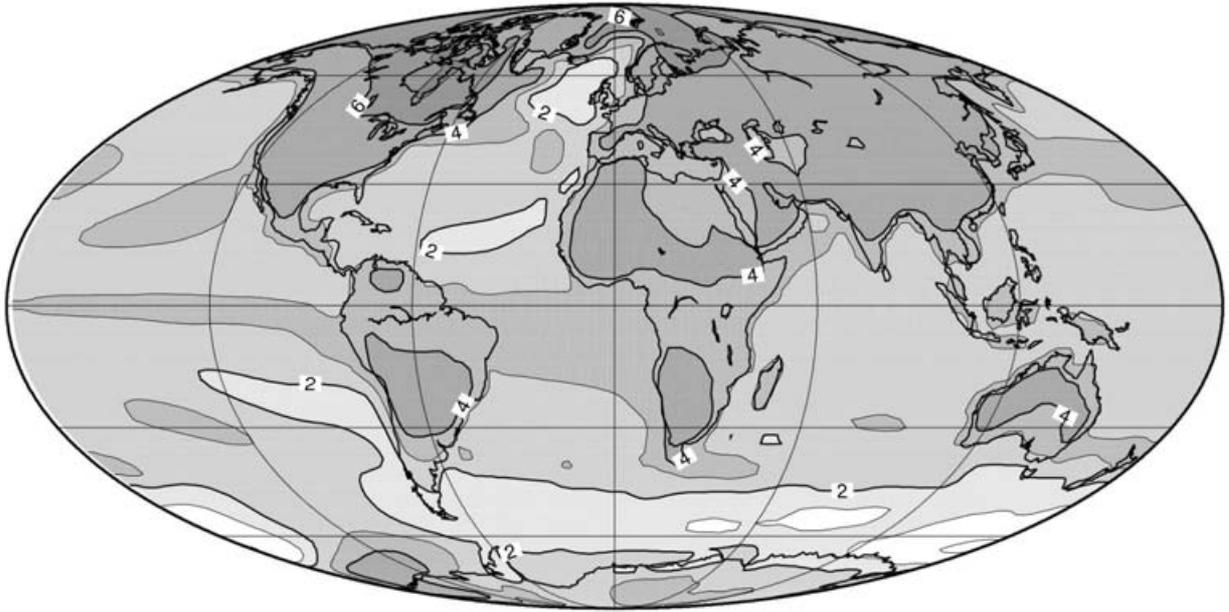
### La régionalisation sur l'Europe

Lorsqu'on examine comment le relief de l'Europe occidentale est représenté par les modèles globaux utilisés par le Giec, on constate que c'est de façon grossière. Pour pouvoir reproduire un relief qui ressemble à une carte de géographie, il faut descendre à une représentation d'un point tous les 50 km et non plus tous les 300. Il est possible, à l'heure actuelle, d'utiliser des modèles globaux à cette échelle, mais le coût informatique de leur utilisation sur des centaines d'années comme demandé par le Giec reste encore prohibitif. On a donc recours à des modèles régionaux qui privilégient une partie de la planète. Dès le début des années 1990, la Commission européenne a encouragé cette approche en finançant des projets multinationaux. Le plus récent est le projet Prudence (<http://prudence.dmi.dk>) qui associe dix modèles régionaux européens dont celui du CNRM. Ce projet, achevé en 2003, s'appuie sur les résultats des modèles globaux du 3<sup>e</sup> rapport du Giec. En effet, les modèles régionaux travaillent sur des tranches de temps de quelques dizaines d'années et ne peuvent modéliser la lente évolution de l'océan. Aussi empruntent-ils la température de surface de la mer (TSM) aux modèles globaux. Les deux modèles régionaux français (CNRM et IPSL) s'appuient sur un modèle couvrant le globe avec une résolution horizontale plus forte sur l'Europe (zoom). Les autres modèles européens ne prennent en compte que le domaine européen et empruntent à un modèle global (le modèle du service météorologique britannique dans le cas de Prudence) les conditions atmosphériques aux frontières du domaine.

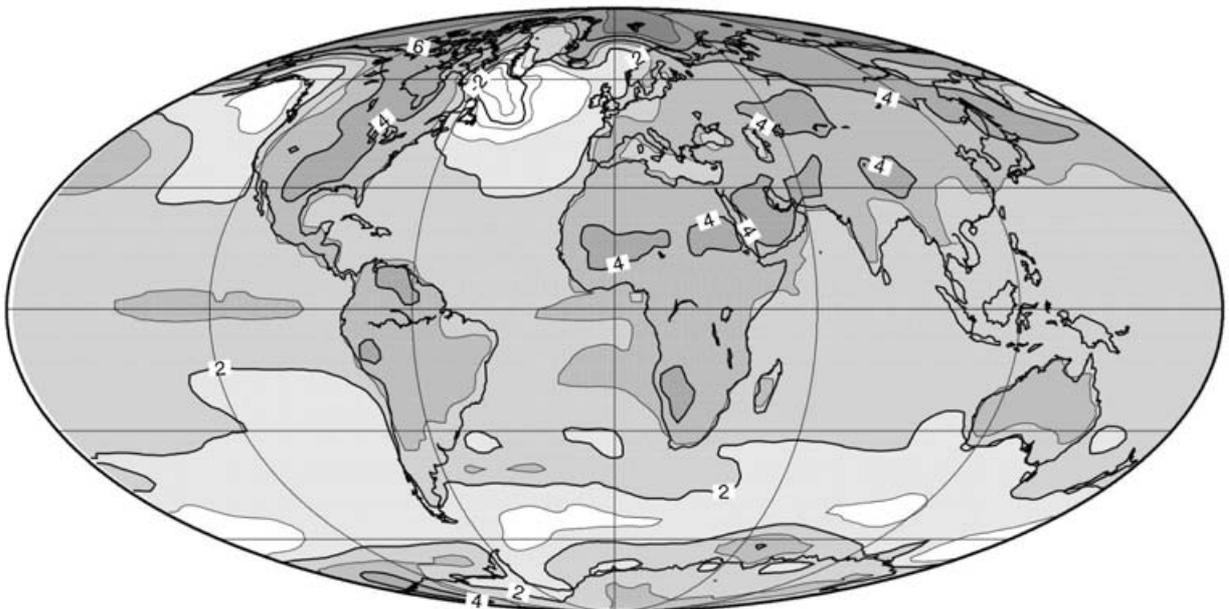
Il est trop tôt pour disposer de résultats multinationaux issus du 4<sup>e</sup> rapport du Giec et régionalisés sur l'Europe. C'est l'objet du projet européen Ensembles (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>) dont les premiers résultats devraient être disponibles en 2008. En attendant, il existe dès à présent une simulation A1B réalisée avec le modèle régional du CNRM qui s'appuie sur les résultats du projet Escrime.

Nous ne montrons pas ici la réponse en température car sa structure spatiale peut être obtenue en posant une loupe sur la figure 1. On peut toutefois mentionner que le réchauffement est maximum en été et minimum en hiver pour les régions tempérées, mais maximum en hiver pour les régions septentrionales. On obtient jusqu'à 6°C en été sur les Balkans avec le modèle régional du CNRM, et 7°C

(a)

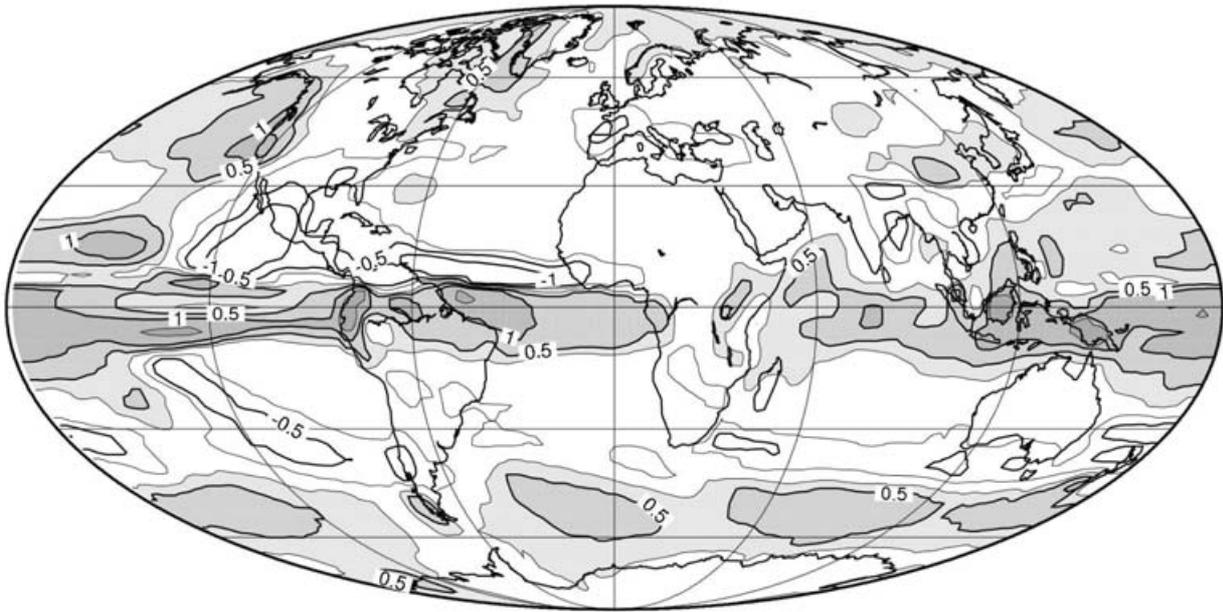


(b)

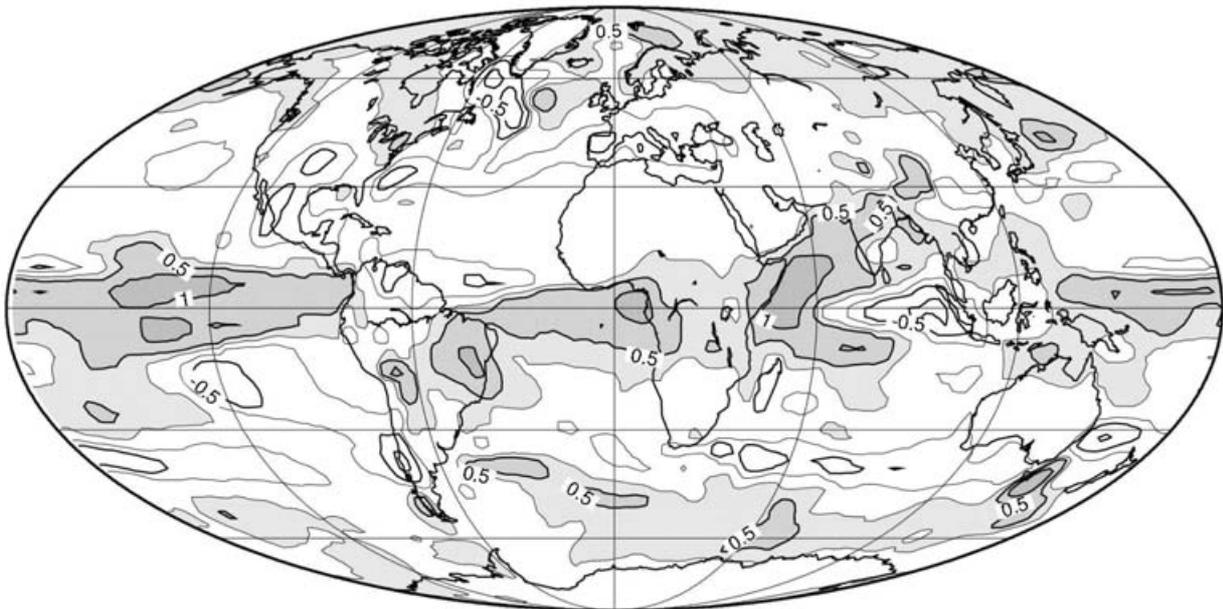


**Figure 1.** Réponse de température (°C) pour le scénario A1B à la fin du 21<sup>e</sup> siècle pour le modèle de l'IPSL (a) et celui du CNRM (b). Isothermes -2, -1, 1, 2, 3, 4, 6 et 8°C, les plages au-dessus de 1°C sont grisées.

(a)



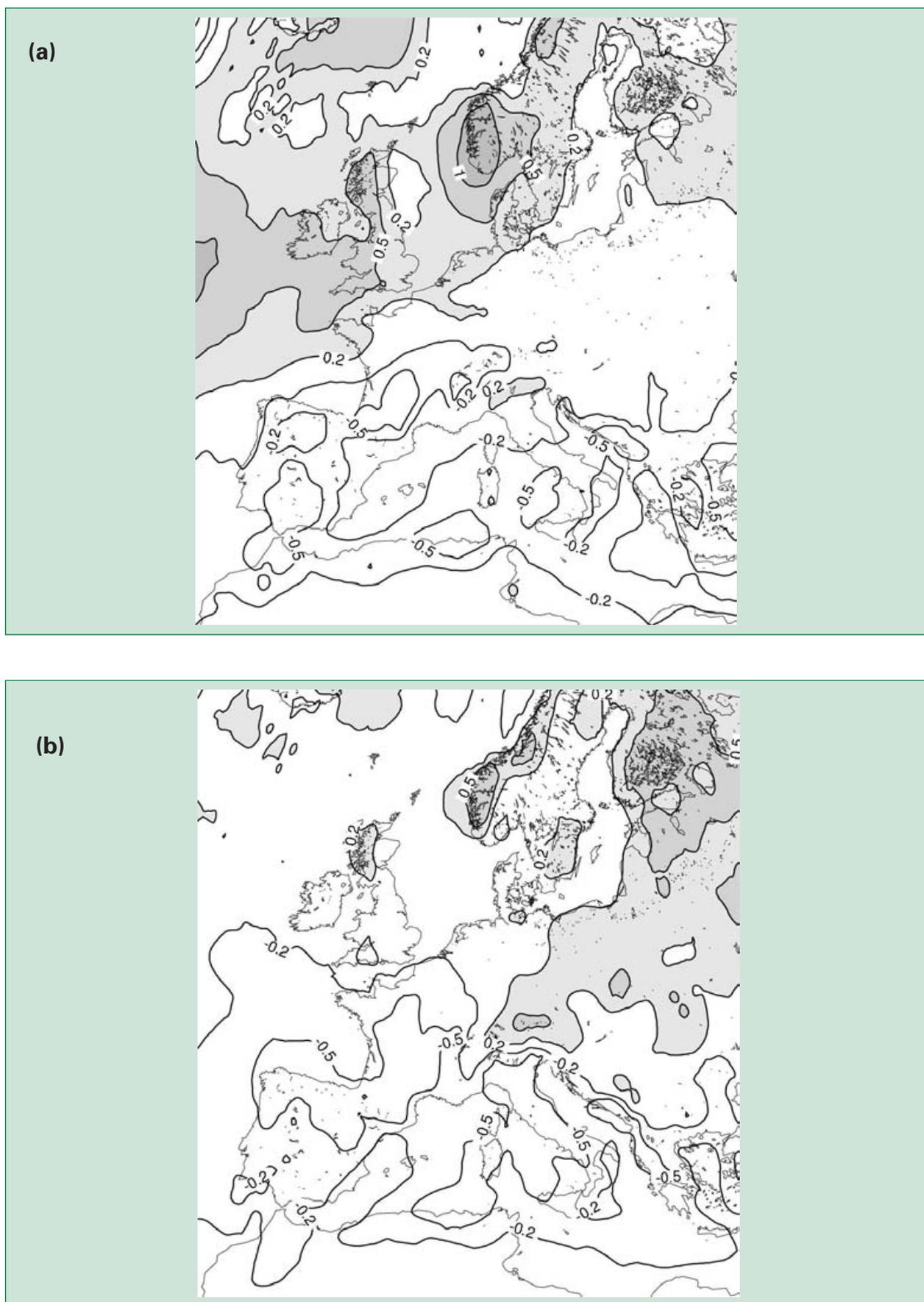
(b)



**Figure 2.** Idem figure 1 pour les précipitations. Isohyètes  $\pm 0,2$   $\pm 0,5$   $\pm 1$  et  $\pm 2$  mm/jour, les plages au-dessus de 0,2 mm/jour sont grisées.

en hiver au nord de la Finlande. Pour les précipitations, une représentation plus fine du relief dans un modèle régional permet d'identifier des climats plus locaux, comme le climat méditerranéen, et donc certains aspects de la réponse du modèle. La figure 3 montre la réponse du modèle régional du CNRM pour les quatre saisons. En hiver, les pluies augmentent au nord de la Manche et

diminuent sur le sud de la France et la Méditerranée. Au printemps, la diminution s'étend à toute la France et l'augmentation ne concerne que la Scandinavie et les Alpes orientales. En été, tout le continent européen connaît une diminution de l'ordre de 20 à 30 %. En automne, la diminution se limite à quelques régions comme le Portugal.



**Figure 3.** Réponse des précipitations (mm/jour) sur l'Europe par le modèle régional du CNRM pour les quatre saisons (DJF :a, MAM :b, JJA :c, SON :d). Isohètes  $\pm 0,2$   $\pm 0,5$   $\pm 1$   $\pm 2$  et  $\pm 4$  mm/jour, les plages au-dessus de 0,2 mm/jour sont grisées.

(c)



(d)



### Les menaces pesant sur l'hexagone

On reproche parfois aux scientifiques du changement climatique de jouer avec la peur, alors que certains aspects du réchauffement global pourraient être bénéfiques. En fait, chaque catastrophe naturelle (hors tremblement de terre) relayée par les médias se voit immédiatement rapprochée du changement climatique. Les deux tempêtes de 1999, la canicule de 2003 lui sont-elles imputables ? A une question posée ainsi, la réponse scientifique ne peut être que non, puisque le climat n'est pas caractérisé par un phénomène ponctuel, mais par la fréquence de certains phénomènes. Une question plus pertinente serait : « les phénomènes cités précédemment ont-ils augmenté en fréquence et va-t-on vers une augmentation au cours du siècle ? » La réponse à la première partie de la question n'est pas possible puisqu'il s'agit de phénomènes uniques dans les annales météorologiques des 50 dernières années. On ne peut évaluer la fréquence, et *a fortiori* l'augmentation de fréquence, que de phénomènes suffisamment répétés (à moins de faire des hypothèses hasardeuses sur leur loi de distribution statistique). C'est donc à la deuxième partie de la question qu'on peut attendre une réponse scientifique.

Le projet national Imfref du programme Gestion et impacts du changement climatique (<http://medias.cnrs.fr/imfref/>) a tenté d'apporter une réponse au niveau de la France métropolitaine (et accessoirement à la question des cyclones sur les Antilles) en ce qui concerne les phénomènes extrêmes. Ce projet s'est appuyé sur les résultats du 3<sup>e</sup> rapport du Giec et le scénario A2. Il n'existe pas encore d'étude sur les phénomènes extrêmes au niveau national sur les dernières simulations A1B, mais il est raisonnable de penser que les résultats d'Imfref resteront qualitativement valables. Ce projet utilise à la fois des simulations du modèle du CNRM et de celui de l'IPSL. Il a développé des techniques statistiques pour tenter d'aller au-delà des limitations des modèles numériques, et s'est intéressé aux trois variables météorologiques fondamentales – vent, température et précipitations – avec des coups de projecteurs sur des phénomènes particuliers comme les coulées de débris ou les épisodes de neige collante.

Pour ce qui est des vents, la principale crainte est une multiplication des tempêtes hivernales de type 1999, ou une aggravation des dommages à fréquence constante. Les deux modèles sont d'accord pour dire que, sur la moitié nord du pays, l'augmentation sera très modeste : la valeur centennale du vent maximum annuel (valeur qu'on a une chance sur cent de voir survenir une année donnée) augmente de 1 m/s environ sur le XXI<sup>e</sup> siècle. Pour la partie sud du pays, une diminution du même ordre est annoncée. Ces résultats seront peut être remis en cause dans les prochains scénarios quand les modèles incluront une paramétrisation des rafales.

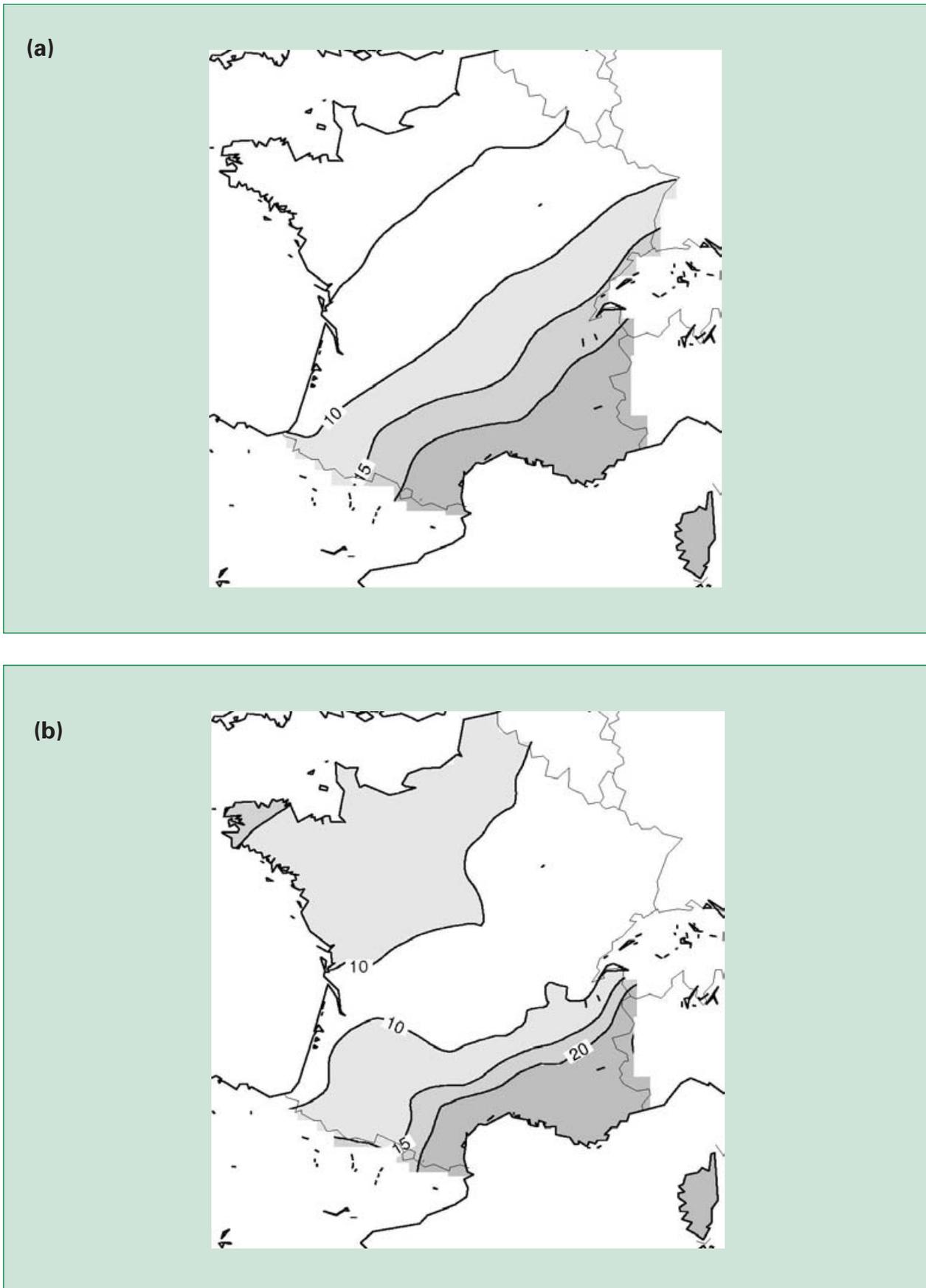
En ce qui concerne les températures, on a vu que le réchauffement est plus marqué en été qu'en hiver. La principale crainte est donc la multiplication des canicules estivales de type 2003. Parmi les diverses façons de définir

une canicule, un consensus s'est établi en Europe autour de la définition suivante : un jour est qualifié de caniculaire si sa température maximale dépasse de 5°C la normale climatique de ce jour (définie sur la référence 1961-1990) et si ce dépassement s'est produit chaque jour durant les cinq jours qui précèdent. Le nombre de jours caniculaires de juin à août pour une année donnée fournit donc un indice à un endroit donné. Par un apparent paradoxe, ce nombre est inférieur à un sur la côte méditerranéenne, alors qu'il atteint trois dans le centre du pays. Cela tient à ce qu'un jour de canicule se réfère à un dépassement par rapport à la climatologie locale. Le climat méditerranéen étant naturellement chaud en été, il est plus rare de dépasser de 5°C la normale. La figure 4 montre, qu'en toutes régions, ce nombre augmente au moins d'un facteur dix dans le scénario du CNRM, et jusqu'à vingt en région méditerranéenne. Le scénario de l'IPSL est en accord sur la moitié sud-est du pays, mais indique une réponse plus modeste sur la moitié nord-ouest. Cette menace estivale, qu'il faut associer à des conséquences de surmortalités humaine, animale ou végétale ainsi qu'aux feux de forêt, ne doit pas nous faire perdre de vue que des hivers plus doux sont synonymes de multiplication de certains parasites de la végétation ; mais l'étude est plus délicate et ce n'est pas aux climatologues seuls d'apporter une réponse à ce danger.

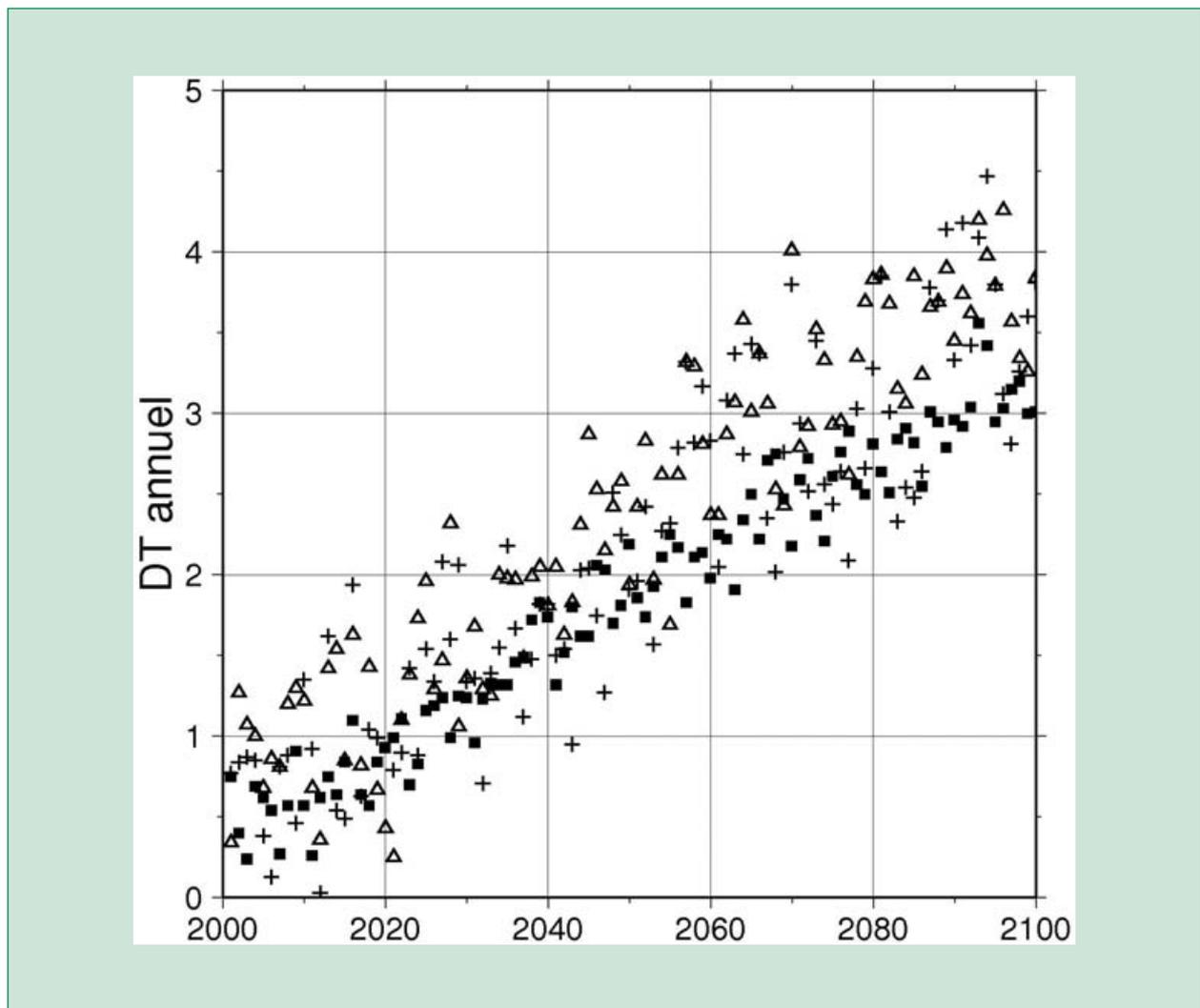
Pour les précipitations, la menace vient des deux côtés. D'une part, en hiver et au printemps, la faible augmentation des pluies affecte surtout les épisodes les plus pluvieux, conduisant à une augmentation du ruissellement renforcé par une fonte nivale plus rapide. Même si le risque de crue au sens hydrologique a été encore peu étudié quantitativement, il y a là un danger potentiel. Mais c'est surtout la sécheresse estivale qui poserait le plus de problèmes dans un pays agricole comme la France. En été, les réserves en eau du sol utilisables par la végétation (les premiers mètres sous la surface) pourraient diminuer et atteindre souvent des valeurs que les racines n'auraient pas la possibilité d'exploiter (point de flétrissement). La question des aquifères est plus complexe et n'a pas encore été très étudiée, mais on se doute que, là aussi, une diminution est à attendre.

### Les échéances

Le choix de la période – la fin du XXI<sup>e</sup> siècle – pour illustrer la réponse des modèles n'est pas une lâche fuite en avant de chercheurs qui redouteraient d'avoir à rendre des comptes de leur vivant. Le problème de la détection d'un signal climatique dans un système naturellement chaotique à toutes les échelles de temps (quotidienne, annuelle, décennale) est délicat et, en maximisant le signal climatique (fin de siècle), on se trouve dans des conditions plus favorables. Pourtant, si on veut prendre des mesures de réduction des émissions, c'est dans les quelques décennies à venir qu'il faut agir et qu'il faut donc se convaincre qu'on ne fait pas fausse route. Si, au contraire, on préfère faire porter tout l'effort sur l'adaptation au changement climatique, les infrastruc-



**Figure 4.** Augmentation de la fréquence des canicules estivales (voir page 24 pour la définition) : rapport entre le nombre de jours de canicule à la fin du 21<sup>e</sup> siècle et celui à la fin du 20<sup>e</sup> siècle pour les modèles de l'IPSL (a) et du CNRM (b). Isolignes de 5 en 5 (grisé au dessus de 10). Noter qu'il s'agit ici de scénarios A2 issus du 3<sup>e</sup> rapport du GIEC.



**Figure 5.** Chronologie du scénario A1B du modèle régional du CNRM : réponse de la température moyenne annuelle (°C) sur le globe (carrés pleins), sur l'Europe (triangles) et sur la France (croix). La période de référence est 1961-1990.

tures à mettre en place (sauf les plantations de forêts à longue rotation) doivent être adaptées aux prochaines décennies : inutile de construire l'an prochain des digues qui ne serviraient que dans cent ans.

La demande de la société porte donc beaucoup plus sur le court terme. On a parfois l'impression que le changement climatique a commencé en 1990 et que les effets décrits par les modèles du Giec vont concerner les dix prochaines années. En fait, le réchauffement a commencé dès 1850 avec l'utilisation massive du carbone fossile, et l'alternance d'épisodes froids et d'épisodes chauds au XX<sup>e</sup> siècle a accompagné et masqué ce lent réchauffement. Il n'y a pas de raisons qu'il en aille autrement au XXI<sup>e</sup> siècle, à la différence près que la vitesse du réchauffement sera deux à quatre fois plus forte.

La figure 5 apporte une illustration de l'aspect transitoire du changement climatique, au moins en ce qui concerne la température moyenne annuelle. Elle s'appuie sur les résultats du dernier scénario A1B du modèle régional du CNRM ; la période de référence est 1961-1990.

Comme ce modèle régional couvre le globe, on peut calculer une évolution de la température globale (trait tireté). On constate que le réchauffement est à peu près linéaire, avec des oscillations de 0,5°C. A la fin du siècle, la température s'est élevée de 3°C. En moyenne, sur l'Europe (trait pointillé), les fluctuations erratiques ont une amplitude plus élevée. Sur la France (trait plein) l'amplitude atteint 2°C, et il faut attendre 2060 pour que les années les plus froides soient plus chaudes que les années 2000-2020. On note également que c'est 2020 l'année la plus froide sur la France. Naturellement, il ne faut pas considérer ces numéros d'années comme des repères chronologiques. Hormis la tendance séculaire qui résulte de l'augmentation de l'effet de serre, les variations de la figure 5 ne sont que l'expression de la fantaisie du modèle et n'ont aucune valeur prédictive. Elles montrent combien il est difficile de détecter le changement climatique à partir de séries de 20 ans (en dehors de la moyenne sur le globe), et combien il est vain de vouloir détailler, décennie par décennie, l'évolution du climat sur un pays.