

## Les scénarios climatiques de réchauffement

Michel Déqué  
Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques

### Introduction

Il y a deux façons de considérer le climat. Si on consulte les manuels de géographie, le climat semble une constante immuable conditionnée par les reliefs environnants, la proximité d'une mer et la latitude. Si on consulte la presse, le climat semble changer chaque année. Tel qu'il est perçu par les météorologues, le climat n'est ni l'un ni l'autre. L'OMM a défini comme climat l'ensemble des paramètres statistiques de la distribution des variables météorologiques sur une période de 30 ans. Cette définition n'exclut pas que sur un siècle le climat puisse évoluer, mais rejette l'attribution de fluctuations interannuelles à une expression de l'évolution du climat. Les mesures faites au cours du 20ème siècle montrent sans l'ombre d'un doute que le climat a changé en de nombreuses régions du globe dont la France.

Que nous réserve le prochain siècle ? Les causes du réchauffement du 20ème siècle sont de plus en plus présentes, et le freinage par inertie de l'océan mondial jouera de moins en moins. Cependant de nombreux paramètres nous sont parfaitement inconnus. La démographie ne nous permet pas de voir au delà de 50 ans. L'économie et les évolutions politiques ont un horizon bien plus proche. Pour voir ce qui pourrait survenir après 2050, on a recours à des scénarios, c'est à dire des hypothèses plausibles. Ces scénarios se traduisent, par le biais de différents modèles, en des conséquences pratiques sur les conditions de vie en France en 2080, et en particulier sur l'agriculture. Dans la chaîne des modèles, le modèle régional de climat traduit l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère et de la température de surface de l'océan en conditions climatiques à l'échelle d'un pays.

Dans ce qui suit, nous montrons comment le modèle ARPEGE, qui est le modèle régional de Météo-France, réagit aux forçages résultats du scénario A2 du GIEC pour les paramètres de température et de précipitations.

### Modélisation du climat

La base du climat est la moyenne, car c'est le paramètre statistique le plus stable. Cependant la société est plus sensible aux extrêmes. L'étude de l'évolution de la fréquence des événements météorologiques extrêmes est limitée par une contrainte sévère: il faut des séries longues et homogènes. Plus le phénomène est rare, plus la série doit être longue. Pour estimer raisonnablement la fréquence d'un événement qui arrive en moyenne une fois tous les cinq ans, il faut cent ans de données. Or, au cours du siècle passé les observations n'ont pas été homogènes, et surtout on a de bonnes raisons de penser que le climat n'a pas été homogène (réchauffement de 0,5°C sur la France en moyenne en un siècle).

Une solution à ce problème vient des simulations numériques. On est sûr de l'homogénéité des séries produites, puisque on maîtrise leur production, et on n'est limité pour la durée des séries que par la puissance de calcul disponible. De plus, on peut décider d'imposer au modèle des changements plus drastiques que ceux subis depuis un siècle (par exemple doubler la concentration de dioxyde de carbone) et ainsi augmenter le rapport signal sur bruit et donc la capacité à discerner les impacts parmi les fluctuations naturelles. Le revers de la médaille est que les séries produites par un modèle n'ont pas la même distribution statistique que les séries observées. Le modèle, bridé par ses

conditions de stabilité numérique, ne peut pas produire de valeurs paroxystiques.

La version régionale du modèle ARPEGE-climat de Météo-France offre, tout en couvrant le globe, une résolution de 60 km sur la France qui permet de représenter sommairement les principaux massifs montagneux de notre pays. Ce modèle a fait l'objet de trois simulations couvrant les 40 dernières années du siècle. Il est donc possible de calculer la distribution des températures et précipitations avec une bonne précision statistique et d'évaluer les contrastes géographiques et saisonniers sur la France.

Quand on compare cette distribution à celle observée au cours des 50 dernières années dans les stations du réseau de Météo-France, on constate que le modèle est assez fidèle dans les plages moyennes. Il restitue assez bien les fréquences de hautes températures et, en hiver, de précipitations abondantes. Il pêche dans les vagues de froid et dans les précipitations abondantes d'été dont il sous-estime les amplitudes. Dans le domaine des faibles précipitations, le modèle exagère le nombre de jours avec des pluies faibles. Cependant, ces biais peuvent se corriger *a posteriori* en considérant qu'une valeur de température ou de précipitation fournie par le modèle n'a de valeur que par rapport à la série des valeurs produites par le modèle. Par exemple les températures minimales diurnes de  $-5^{\circ}\text{C}$  au point du modèle le plus près de Paris sont rares dans la série climatique simulée et correspondent, en terme de fréquence, aux minimales de  $-10^{\circ}\text{C}$  observées à Orly. Une fois les biais corrigés, on dispose de séries modélisées qui ont la même distribution statistique, par construction, que les séries observées à la station météorologique la plus proche.

### **Scénario climatique**

Une des simulations de 40 ans mentionnées plus haut (1961-2000) a été poursuivie durant tout le 21ème siècle en utilisant l'hypothèse de croissance des concentrations en gaz à effet de serre du scénario baptisé A2 par le GIEC. On dispose d'une série de 140 ans de données quotidiennes simulées. La figure 1 montre l'évolution temporelle des températures moyennes de juillet au cours de la période pour le point de grille le plus proche de Paris. Aucune correction n'est effectuée sur la série car l'évaluation de la tendance temporelle est indépendante de la correction appliquée. Il faut bien souligner que les années individuelles qui apparaissent en abscisse ne sont pas représentatives des années du calendrier. Il s'agit d'années-modèle. En particulier, on ne retrouve pas de pic en 2003 dans cette simulation et le contraire aurait été le fruit du hasard. On peut faire des constatations intéressantes sur cette figure, au delà de la simple observation de la tendance au réchauffement. La variabilité interannuelle masque cette tendance jusque vers 2050. Si on masquait les 60 dernières années du diagramme, il faudrait de l'imagination pour voir une tendance au réchauffement. Ceci explique pourquoi les études de scénario se concentrent sur la période 2071-2100 et illustre la difficulté de détecter un changement régional dans les séries observées du siècle passé. Les extrêmes de cette série montrent que les mois les plus chauds de 1961-2000 sont plus chauds que les étés les plus frais de la fin du 21ème siècle. Cependant, on ne trouve plus de température inférieure à  $17^{\circ}\text{C}$  au delà de 2010, tandis que des températures supérieures à  $25^{\circ}\text{C}$  ne sont rencontrées qu'après 2050.

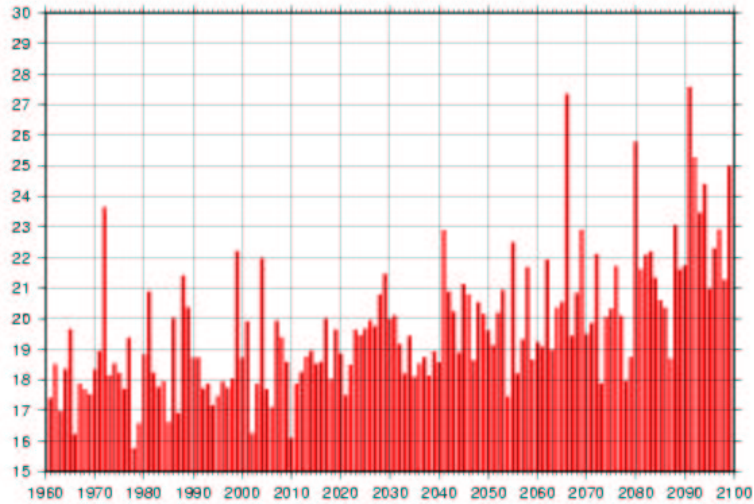


Figure 1: Températures moyennes de juillet (°C) simulées au point de grille de plus plus proche de Paris dans une simulation numérique de 140 ans.

### Scénario et moyennes

Pour décrire un climat possible de la fin du 21ème siècle, nous présentons ici les températures (figure 2) et les précipitations (figure 3) d'hiver et d'été sur la métropole dans le climat simulé, mais recalibré par rapport aux observations comme indiqué plus haut, de la fin du 20ème siècle et dans le climat de la fin du 21ème siècle sous l'hypothèse A2.

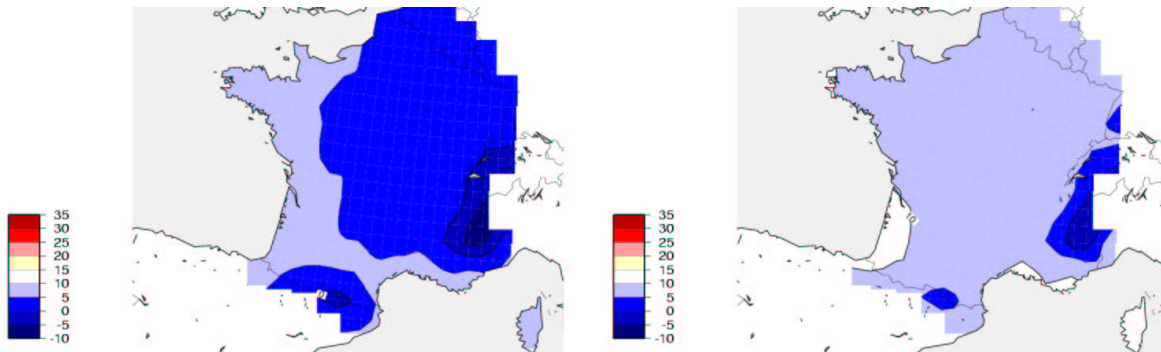


Figure 2a: Température moyenne en hiver (°C): climat actuel (gauche) et scénario A2 (droite)

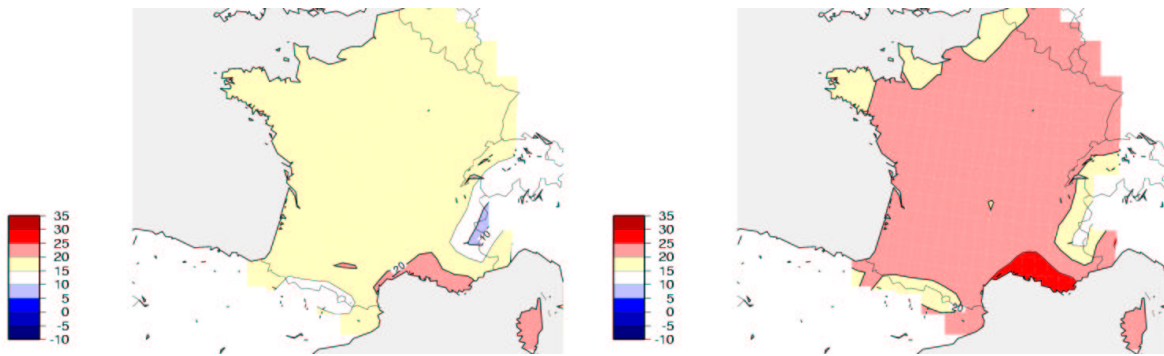


Figure 2b: Température moyenne en été (°C): climat actuel (gauche) et scénario A2 (droite)

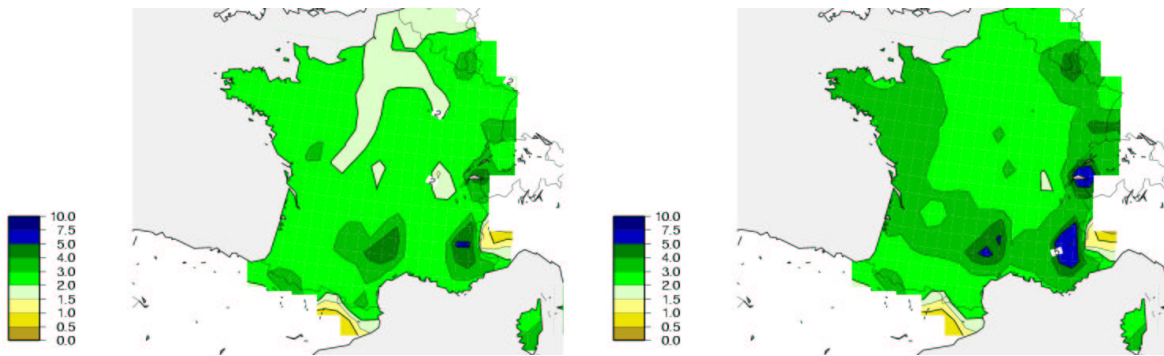


Figure 3a: Précipitations moyennes en hiver (mm): climat actuel (gauche) et scénario A2 (droite)

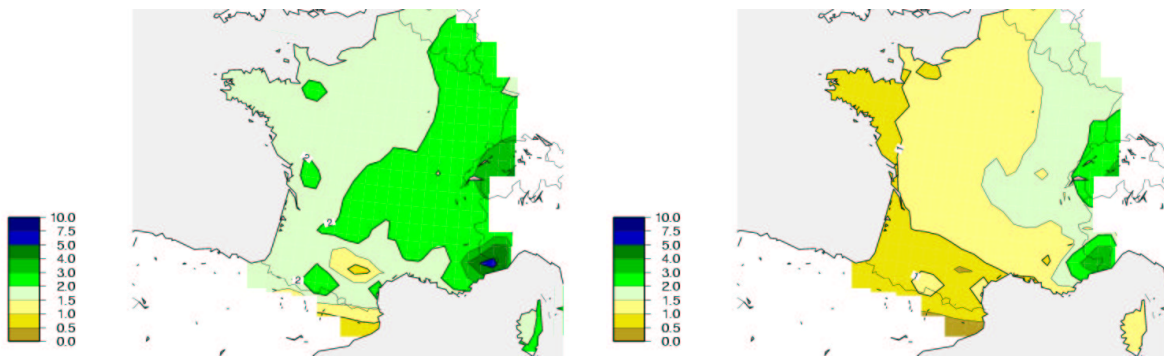


Figure 3b: Précipitations moyennes en été (mm): climat actuel (gauche) et scénario A2 (droite)

### Scénario et extrêmes

Dans le cadre du projet européen PRUDENCE et du projet français GICC-IMFREX, le modèle a fait l'objet de trois simulations de 30 ans avec des conditions supposées pour les années 2070-2099 dans l'hypothèse du scénario A2 du GIEC et les températures de surface de la mer fournies par le Hadley Centre (centre de recherche britannique). L'expérience de 140 ans citée au paragraphe précédent utilise un autre jeu de températures de surface de la mer, calculé avec le modèle couplé océan-atmosphère de Météo-France. Les séries quotidiennes ont subi le même traitement que celles du 20<sup>ème</sup>

siècle. On fait l'hypothèse (raisonnable mais invérifiable) que les défauts du modèle ne dépendent pas crucialement de la perturbation climatique introduite via les concentrations des gaz à effet de serre. On peut donc calculer de nouvelles fréquences pour des phénomènes rares, mais assez nombreux pour constituer un échantillon. On peut remarquer que si on avait raisonné en terme de quantile (ex : le quantile de température à 95% augmente de X°C) au lieu de raisonner en terme de fréquence (ex : la fréquence des températures maximales supérieures à 30°C augmente de X%), il n'y aurait pas eu besoin de calibrer les séries du modèle par rapport à l'observation. Mais le public et les usagers ont besoin de se situer par rapport à des seuils, et l'approche par fréquence répond à leur besoin.

La table 1 présente pour 8 villes françaises et les 8 points de grille du modèle les plus proches, les probabilités de dépassement du seuil 35°C par la température maximale quotidienne (la figure 1 présente des températures moyennes mensuelles, il ne s'agit donc pas du même paramètre) pour le climat présent et pour le climat projeté à la fin du 21ème siècle. Ces résultats ont été obtenus avec des données observées non homogénéisées issues de la base de données « Climathèque » de la Direction de la Climatologie de Météo-France .

	Lille	Rennes	Paris	Strasbourg	Lyon	Bordeaux	Toulouse	Marseille
<b>Actuel</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
<b>Scénario</b>	0,05	0,09	0,11	0,13	0,22	0,12	0,24	0,27

Table 1: Probabilité d'avoir une température maximale supérieure à 35°C en été pour le climat actuel et le scénario A2.

Le modèle ayant environ 300 points de grille sur notre sol, on peut affiner géographiquement les résultats ci-dessus en utilisant les 91 séries quotidiennes de référence établies par la Direction de la Climatologie de Météo-France dans le cadre du projet IMFREX. Chaque point de grille du modèle est corrigé à partir de la station d'observation la plus proche. La figure 4 montre que la plage de probabilité 0,02-0,05 qui couvre actuellement le sud-ouest et la Provence (à l'échelle du modèle) concernerait tout le pays. Ces deux régions connaîtraient, dans l'hypothèse du scénario A2, des probabilités entre 0,20 et 0,30.

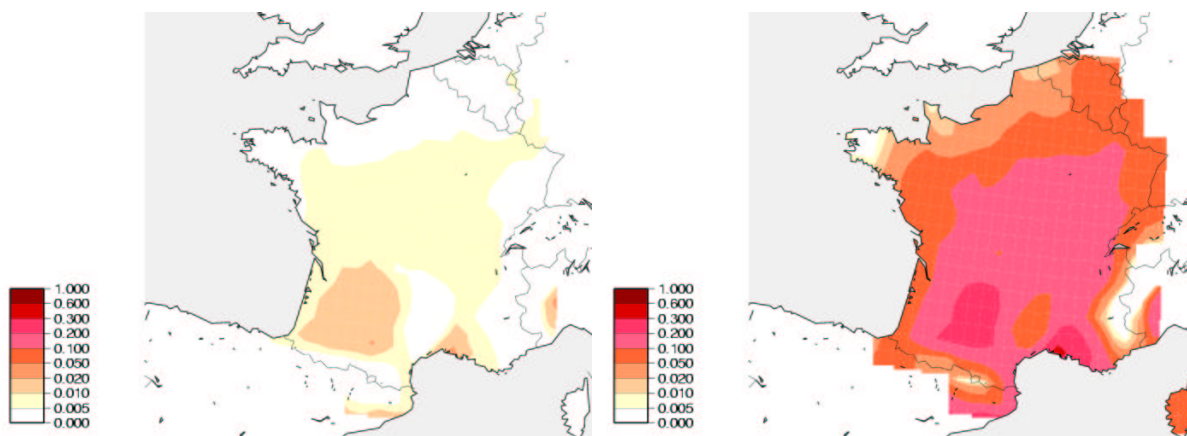


Figure 4: Probabilité d'avoir une température maximale supérieure à 35°C en été pour la période 1961-1990 (à gauche) et la période 2071-2100 (à droite).

## **Conclusion**

Le principal impact sur la France du changement climatique est:

- une augmentation de la température en toutes saisons
- une augmentation des pluies d'hiver
- une diminution des pluies d'été

Le caractère assez spectaculaire de l'impact sur la fréquence des vagues de chaleur estivales s'explique par le fait que dans nos régions, la valeur 35°C se situe dans une plage où la densité de probabilité décroît très rapidement. Ainsi une faible variation en température se traduit par une forte variation en fréquence. Quand on applique cette méthode à d'autres seuils (25°C), d'autres régions du monde (les tropiques), ou d'autres paramètres (les précipitations), la réponse du changement climatique en terme de probabilité est plus modeste.