



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 535–543



Géophysique externe, climat et environnement (Climat)

À l'échelle des continents : le regard des modèles

Serge Planton

Météo-France, Centre national de recherches météorologiques, 31057 Toulouse cedex 1, France

Reçu le 29 octobre 2002 ; accepté le 8 avril 2003

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

La crédibilité des modèles simulant les changements climatiques dans les différentes régions continentales se fonde sur l'analyse de la dispersion des résultats d'ensembles de simulations. Cette analyse, combinée à celle des biais des modèles par rapport aux observations, montre qu'il n'y a pas de relation systématique entre ces biais et les changements climatiques simulés. La réduction des incertitudes aux échelles des différentes régions implique une meilleure définition des scénarios d'émissions anthropiques et le développement de modèles régionaux de simulation du climat. La détection des changements climatiques à l'échelle régionale s'avère être une voie prometteuse pour renforcer la crédibilité de ces modèles et de ces scénarios. **Pour citer cet article :** *S. Planton, C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

At the continental scale: the models' viewpoint. The credibility of models simulating climate change over different continental regions is based upon analysis of the dispersion of results of simulation ensembles. This analysis, associated to the analysis of model biases, shows that there is no systematic link between these biases and the simulated climate changes. The reduction of uncertainties on the scales of different regions implies a better definition of anthropogenic emission scenarios and the development of regional climate models. Climate change detection on regional scales appears to be a promising way of reinforcing the reliability of these models and scenarios. **To cite this article:** *S. Planton, C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : crédibilité ; modèles ; changements climatiques ; sous-continentes ; détection

Keywords: credibility; models; climate change; region; detection

Abridged English version

Simulations performed with ensembles of climate models following similar greenhouse gas and aerosol concentration scenarios give a first evaluation of the dispersion of climate change at the continental or sub-

continental scale. An analysis of Kittel et al. [10], after the results of nine coupled ocean–atmosphere models simulating the climate impact of a 1% per year increase of CO₂ atmospheric concentration, gives roughly the same conclusions as those reported in the third assessment report [8] for comparable regions. These authors suggest that regions corresponding to greater dispersion of model results are those that exhibit strong climatic gradients varying seasonally. This

Adresse e-mail : serge.planton@meteo.fr (S. Planton).

is particularly the case for regions where climate depends upon the location of the intertropical convergence zone or for northern Europe, where winter climate is influenced by the North Atlantic storm track location and limits of snow cover. Simulated temperature and precipitation changes appear to be correlated in each region. This supports the idea of existing mechanisms controlling regional and seasonal climate changes, which are reproduced by the models but with varying sensitivities. For a given model, the correlation between temperature or precipitation biases over the different regions and corresponding climate change, are on the contrary poorly correlated. This implies that mechanisms controlling climate change are generally distinct from those that control the mean climate.

To assess the uncertainties of climate change, analysis of model dispersion results should be completed by studying underlying mechanisms in each region and season. The credibility of models may be reinforced or limited according to the robustness of these mechanisms and analysis of their occurrence in the real world from long-term observations. They also need to be different, as this is generally the case, from those that explain model systematic errors, to reinforce the credibility of simulated climate change.

The sources of uncertainties on regional scale are basically the same as those of climate change simulations on the global scale. These uncertainties may be amplified in specific regions, in particular when mechanisms controlling climate change are poorly simulated. This may be illustrated with the simulation of the impact of climate change on the frequency and intensity of the strongest storms reaching western Europe.

Another source of uncertainty in climate change over Europe comes from the representation of climate processes by models. One way to illustrate this is to apply a method proposed by Crossley et al. [2] to the results of the LSPCR (*Land Surface Processes and Climate Response*) project. For this study, four different climate models were used to simulate present and doubling CO₂ climates. The two types of simulations were repeated with each model using two different representations of land surface processes. The sensitivity of climate change to the representation of surface processes is calculated by Crossley et al. as the ratio between the dispersion of results linked to the land

surface scheme in each model, and the dispersion of results due to the choice of different models. In Fig. 1, this sensitivity ratio has been reproduced, applied to simulated changes of evapotranspiration, monthly averaged over northern and southern Europe. It appears that, while sensitivity remains weak and roughly constant over northern Europe, it presents a peak value in summer in the South. It may be concluded that for this region and season, the uncertainty of evapotranspiration change, and thus of surface temperature change, is linked to the representation of land surface processes.

The uncertainty reduction thus implies the improvement of the representation of mechanisms that control the regional climate response, as it implies a better definition of anthropogenic emission scenarios, particularly aerosols, which modulate this response. The development of regional climate models (RCMs) also appears to be a promising way forward.

Studies of RCMs performances, compared to general circulation models (GCMs), show that they reproduce improved surface temperature and the spatial or temporal distribution of precipitation, due to better descriptions of orography [8]. While large-scale features of climate change are similar between RCMs and GCMs providing their boundary conditions, mesoscale structures influenced by orography, land-sea contrasts or surface properties are notably different. Changes in daily precipitation variability are also significantly different between the two types of models. All these differences explain that some impacts of climate change are sensitive to the model's horizontal resolution. Climate impact on river flow may be in particular more reliable when using RCM scenarios for a better simulation of snow melt processes.

Regional climate change detection has recently been successfully applied to 30-year trends of summer daily minimum temperatures in France [16]. The 'optimal fingerprint' method applied here combines homogenised long-time series of observed temperatures [12] and an ensemble of RCM climate-change simulations [6]. This result is encouraging, as it shows that RCMs are able to reproduce climate responses to external forcing, which are consistent with recent observations. This increases the credibility of these models.

It must be noted that such detection studies cannot be applied to the occurrence of some extreme events

in France and thus cannot reinforce the credibility of models in this respect. The curve of the standardized 95-percentile of geostrophic wind calculated every year from surface pressure measurements at five meteorological stations (Fig. 2) indeed exhibits a multi-decadennial variability, but no trend over the 1949–1999 period. An analysis of intense precipitation in south-eastern France also shows the absence of a significant trend in the number of these events over the 1958–2001 period (Fig. 3).

1. Les résultats des modèles

1.1. Résultats des simulations couplées globales

Les modèles climatiques globaux incluant un couplage entre l'évolution de l'atmosphère et celle de l'océan nous donnent une première évaluation des réponses du climat aux émissions de gaz à effet de serre aux échelles continentales et sous-continentales (nous employons dans la suite le terme de « région » pour désigner cette échelle spatiale, typiquement comprise entre 10^4 et 10^7 km²). Des simulations réalisées en respectant un protocole expérimental identique, mais utilisant un ensemble de modèles développés par différents centres de recherche internationaux, permettent de donner une première idée de la dispersion des résultats à ces échelles. Le troisième rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) [8] inclut notamment une synthèse de résultats obtenus à partir de neuf modèles climatiques simulant l'évolution du climat en réponse à deux scénarios de concentrations de gaz à effet de serre et de particules sulfatées. Une classification simple des changements de température simulés pour la fin du XXI^e siècle sur une vingtaine de grandes régions fait en particulier ressortir un accord général pour un réchauffement plus intense de la partie nord des continents de l'hémisphère nord en hiver (dont l'Europe du Nord) et de l'Europe du Sud en été. Le réchauffement est souvent d'amplitude indéterminée dans les régions équatoriales. Une analyse analogue des changements de précipitations fait ressortir une indétermination nettement plus importante que pour la température, y compris pour le signe de ces changements. Cependant, les modèles s'accordent en particulier pour reproduire une augmentation des précipitations en hiver dans les régions les plus au nord de l'hémisphère

nord et une diminution marquée des précipitations estivales en Europe du Sud, dans le cas du scénario d'émissions le plus extrême.

1.2. Des mécanismes à l'origine de la dispersion des résultats

Une analyse de Kitell et al. [10] portant aussi sur les résultats de neuf modèles couplés océan-atmosphère, mais simulant les effets d'une augmentation régulière de la concentration du CO₂ atmosphérique au taux de 1%/an, montre sensiblement les mêmes résultats pour les régions comparables des deux études. Ces auteurs suggèrent que les régions qui montrent des changements climatiques simulés les plus dispersés sont souvent des régions de forts gradients climatiques évoluant saisonnièrement et pour lesquelles la simulation du climat présent est aussi la plus délicate. Les régions concernées sont notamment celles dont le climat est dépendant de la position de la zone de convergence intertropicale, en particulier en été pour la région qui comprend le Sahel. La température moyenne de l'Europe du Nord, dont la variabilité climatique est influencée par la position du rail des dépressions de l'Atlantique nord et par la couverture de neige, apparaît aussi comme présentant des biais importants et une grande dispersion des changements de température simulés en hiver.

Pour une même région, les changements de température et de précipitation simulés par les différents modèles apparaissent corrélés. La conclusion qu'en tirent les auteurs est que des relations dynamiques, propres à chaque région et à chaque saison, existent entre ces paramètres et sont représentées par les modèles sous des conditions de forçage déterminées. L'idée sous-jacente est que les changements climatiques induits par un forçage déterminé répondent à des mécanismes que les modèles représentent dans leur ensemble, mais avec une plus ou moins grande sensibilité. Il n'est bien sûr pas toujours possible d'identifier un mécanisme physique ou dynamique dominant, expliquant l'essentiel de la relation entre les changements thermiques et hydriques. Pour l'Europe du Nord, en hiver, il est cependant possible d'avancer que le changement climatique se manifeste au travers de la pénétration d'air plus chaud et plus humide au-dessus du continent, induisant ainsi une corrélation positive entre le réchauffement et l'augmentation des pluies. De plus, la modification des régimes de temps avancée par certains

auteurs [1] pourrait aussi être à l'origine d'une amplification de ce mécanisme, en rendant plus fréquents les régimes d'oscillation nord-atlantique positive qui favorise le passage des dépressions sur le Nord de l'Europe.

1.3. Changements climatiques et erreurs systématiques

Un autre résultat tiré de l'étude de Kittel et al. est que, pour un modèle donné, la corrélation entre les biais de températures (ou de précipitations) dans les différentes régions et les changements climatiques associés sont peu ou non corrélés. De plus, la dispersion des changements climatiques simulés par les différents modèles est nettement inférieure à celle des biais des modèles. Une conclusion qui pourrait en être tirée est que, généralement, les changements climatiques ne dépendent pas fortement de la façon dont les modèles reproduisent le climat actuel. Cela implique que les mécanismes dominant les changements climatiques sont, le plus souvent, distincts de ceux qui contrôlent le climat moyen. Cette conclusion va bien dans le sens de l'analyse de Crossley et al. [2], qui montre que les processus de surface jouent un rôle différent sur le maintien du climat moyen et sur la sensibilité du climat à un forçage par le CO₂. Cette absence de relation ne peut bien sûr être totalement exclue, dans la mesure où certaines erreurs des modèles pourraient aussi introduire des biais dans les changements climatiques simulés. Ce serait par exemple le cas d'un modèle présentant le défaut d'une circulation trop zonale sur l'Atlantique, qui pourrait simuler une augmentation exagérée des pluies en hiver sur l'Europe. Dans ce cas, un même mécanisme domine le changement climatique et contrôle fortement le climat moyen. Seule une analyse combinée des sources d'erreurs systématiques des modèles et des mécanismes expliquant les changements climatiques peut permettre d'identifier ce type de situation.

2. Les incertitudes à l'échelle des régions et sous-régions continentales

2.1. Les diverses sources d'incertitude

Les études de la dispersion des résultats d'ensembles de simulations des changements climatiques

et des mécanismes sous-jacents sont indispensables pour évaluer le degré de confiance à accorder aux modèles. Mais la dispersion des résultats des modèles n'est qu'un reflet partiel des incertitudes sur les conséquences climatiques des émissions de gaz à effet de serre. Les sources d'incertitudes à l'échelle d'une région continentale ou sous-continentale sont fondamentalement les mêmes que celles qui affectent les projections des changements climatiques à l'échelle planétaire. Il s'agit des incertitudes des scénarios de base servant d'entrée aux simulations des changements climatiques, les incertitudes sur la modélisation du système climatique et de ses interactions ou encore les incertitudes liées au caractère en partie chaotique du climat. Différentes raisons peuvent être données pour expliquer l'amplification de ces incertitudes à l'échelle d'une région particulière. La plus importante est liée à la difficulté de représenter certains mécanismes jouant un rôle particulièrement important sur les changements climatiques de la région concernée. Nous allons l'illustrer sur quelques exemples intéressant plus particulièrement l'Europe.

2.2. Les mécanismes des changements climatiques en Europe

Nous avons déjà évoqué le rôle joué par le rail des dépressions sur les changements de température en Europe du Nord. Pour étudier l'impact des changements climatiques sur les tempêtes touchant l'Europe occidentale, il importe de bien reproduire la genèse des dépressions (cyclogénèse) et la trajectoire des systèmes dépressionnaires au-dessus de l'Atlantique nord. Or, cette représentation, et en particulier celle des dépressions les plus creuses à l'origine de tempêtes les plus intenses, se situe à la limite de la capacité des modèles climatiques usuels, en premier lieu du fait des échelles spatiales les plus petites que ces modèles peuvent résoudre. En se limitant aux systèmes que les modèles sont capables de reproduire, les études conduites à ce jour donnent des résultats très contrastés en terme d'impact des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des tempêtes. Ces résultats s'expliquent par la difficulté des modèles à reproduire les mécanismes à l'origine de l'instabilité atmosphérique, notamment les effets des changements climatiques sur les gradients horizontaux de températures au-dessus de l'Atlantique nord [13,15].

Une autre source d'incertitude sur les changements climatiques en Europe, mais plus particulièrement dans sa moitié sud et en été, résulte de leur sensibilité à la représentation des processus de surface par les modèles. Cette sensibilité a été mise en évidence à partir des résultats de différentes simulations d'impact climatique d'un doublement de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, simulé par un ensemble de quatre modèles atmosphériques européens. Le protocole expérimental de l'étude, conduite dans le cadre du projet européen LSPCR (*Land Surface Processes and Climate Response*), consistait à simuler les changements climatiques en utilisant tour à tour deux versions de la représentation des processus de surface dans chacun de ces modèles. La sensibilité des changements climatiques à la représentation des processus de surface peut être évaluée en faisant le rapport entre la dispersion des résultats liée au choix du schéma de surface dans chaque modèle et la dispersion liée au choix des différents modèles [2]. La Fig. 1 illustre le résultat obtenu dans le cas des changements d'évapotranspiration en surface, mois par mois, pour la moitié nord et la moitié sud de l'Europe. La sensibilité reste faible et relativement constante pour la moitié nord, mais augmente au cours de l'été au sud. Une analyse plus approfondie des résultats des simulations suggère que cette plus forte sensibilité est attribuable à une influence dominante du stress hydrique (et donc de sa représentation dans les modèles) sur les changements d'évapotranspiration et, de ce fait, de températures de surface.

2.3. Des sources additionnelles d'incertitude à l'échelle régionale

Les imprécisions sur les scénarios d'émissions des gaz à effet de serre et des particules restant en suspension dans l'atmosphère (aérosols) sont une source additionnelle d'incertitude à l'échelle régionale. Ces dernières ont des effets sur le climat, liés notamment à leur absorption du rayonnement solaire ou à leur rôle sur la condensation nuageuse. L'impact climatique des aérosols dépend fortement de la distribution géographique de leurs sources anthropiques, en raison de leur durée de vie limitée par le mécanisme de déposition sec ou humide qui purifie la basse atmosphère. Or, la spécification de ces sources est difficile à anticiper, introduisant ainsi une cause spécifique d'incertitude sur les changements climatique à l'échelle des continents

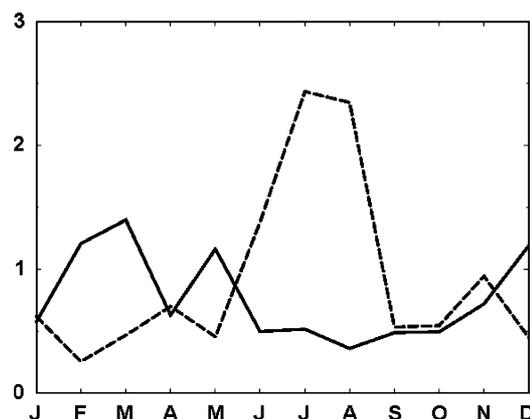


Fig. 1. Sensibilité des changements d'évapotranspiration simulés à la représentation des processus de surface pour l'Europe du Nord (trait plein) et l'Europe du Sud (trait pointillé) (voir texte). Cette sensibilité est calculée à partir d'un ensemble de simulations de changement climatique réalisées par différents modèles, comme le rapport entre la dispersion des résultats liée au choix du schéma de surface dans chaque modèle et la dispersion liée au choix des différents modèles.

Fig. 1. Sensitivity ratio of simulated evapotranspiration changes to the representation of surface processes for northern Europe (solid line) and southern Europe (long dashed line) (see text). This sensitivity is calculated from an ensemble of climate change simulations performed with different models, as the ratio between the dispersion of results due to the choice of the land surface scheme in each model and the dispersion of results due to the choice of different models.

ou des sous-continent. La représentation, encore très imparfaite, des processus de déposition dans les modèles, associant transformations chimiques et processus microphysiques, est une source additionnelle d'incertitude à ces mêmes échelles.

La réduction des incertitudes passe donc par une meilleure définition des scénarios d'émissions anthropiques. Elle implique aussi une amélioration de la représentation des processus qui déterminent la réponse du climat à l'échelle d'une région. Le développement de méthodes de régionalisation du climat est aussi, comme nous allons le voir, une voie prometteuse.

3. Applications de la régionalisation dynamique du climat

3.1. Les performances des modèles régionaux

L'utilisation de modèles couvrant un domaine géographique délimité, à plus forte résolution que les

modèles de circulation générale (MCG) habituellement utilisés pour simuler les changements climatiques, date d'une dizaine d'années. La simulation des changements climatiques par ces modèles implique la définition de conditions aux limites (frontières du domaine, surface océanique) qui leur sont fournies par les résultats de simulations de MCG. Nous rangerons aussi dans cette catégorie de modèles climatiques régionaux (MCR) des MCG à résolution variable, développés en particulier en France, qui permettent aussi d'obtenir une résolution accrue dans une région déterminée, tout en simulant les interactions avec le climat des autres régions.

De nombreuses études ont été réalisées pour évaluer les performances des MCR par rapport au MCG pour la représentation du climat actuel [8]. L'amélioration est évidente pour ce qui concerne la simulation des températures de surface, en raison d'une meilleure représentation du relief dans les modèles de plus forte résolution. En revanche, si la distribution spatiale des précipitations, aussi fortement influencée par le relief, est également mieux reproduite, il n'en est pas nécessairement de même des valeurs moyennes. La seule augmentation de résolution d'un modèle, ne s'accompagnant pas d'un ajustement de la représentation des processus physiques, peut, dans certaines situations, conduire à l'amplification des précipitations moyennes, du seul fait d'une meilleure prise en compte du relief. Une amélioration assez sensible peut aussi être notée sur la distribution temporelle des pluies. Une analyse récente portant sur la simulation des précipitations dans les Alpes par quatre modèles à aire limitée et un modèle à résolution variable montre toutefois que les événements de pluies intenses peuvent être encore sous-évalués par les MCRs, particulièrement en été et dans les régions au relief perturbé [4].

3.2. *Changements climatiques et études d'impact*

Les changements climatiques simulés par les MCRs présentent les mêmes caractéristiques de grande échelle que celles des changements calculés par les MCG, qui leurs fournissent les conditions aux limites. En revanche, les structures de moyenne échelle sont influencées par le relief, le trait de côte où les propriétés de surface sont sensiblement différentes [8]. La dépendance des changements de température avec l'alti-

tude apparaît plus clairement dans les MCR, en raison d'une meilleure représentation de l'effet de la fonte des neiges qui, en diminuant l'albédo, amplifie le réchauffement. Les changements de variabilité journalière de la température sont similaires dans les MCR et les MCG (décroissance en hiver et croissance en été), mais les changements de variabilité des précipitations peuvent être différents, en particulier en été, avec une augmentation de la variabilité des précipitations plus importante dans les MCR. Par ailleurs, certaines études montrent une moindre croissance du nombre d'événements de fortes précipitations dans des MCR comparés aux MCG associés.

Les différences entre les changements climatiques simulés par les deux types de modèles sont suffisamment importantes pour induire des réponses significativement différentes en terme d'impact de ces changements. Une illustration en est donnée par Mearns et al. [11], qui montrent que la résolution des scénarios de changement climatique a un impact marqué sur le calcul de rendements de différentes cultures des grandes plaines américaines. Une autre illustration peut être donnée en comparant les changements de débits de fleuves, calculés en suivant un scénario de changement climatique issu d'un MCG et un scénario analogue calculé par un modèle à résolution variable [14]. Une meilleure représentation du processus de fonte des neiges dans le second conduit à une simulation a priori plus fiable des changements de débit. Nous sommes tentés de conclure que, lorsque les impacts sont très sensibles à l'échelle des scénarios de changement climatique, ce qui est le cas lorsqu'ils sont très sensibles à l'orographie, les études d'impacts fondées sur des MCR sont plus crédibles que celles qui sont fondées sur les MCG dont ils sont issus. Cette affirmation ne vaut cependant que si les modèles de plus forte résolution sont validés à l'échelle à laquelle ils sont appliqués, ce qui suppose une adaptation de la représentation de certains processus physiques (nuages, convection...).

4. **Détection des changements climatiques à l'échelle régionale**

La détection d'un signal de réchauffement du climat dans les observations récentes a fait l'objet de plusieurs études statistiques. L'une d'entre elles,

combinant les observations de tendances sur 30 ans des températures de surface à « l’empreinte digitale » du réchauffement calculé à partir de scénarios de changement climatique simulés à basse résolution, conclut à la détection d’un signal de réchauffement dû à un forçage externe au système climatique [7]. Ce résultat a été confirmé par des études ultérieures et interprété comme étant essentiellement dû aux activités humaines [8]. Aucune étude n’avait jusqu’à ce jour été conduite à partir de résultats de simulations réalisées au moyen de MCR. La disponibilité récente de longues séries de données homogènes de forte densité spatiale [12] et d’ensemble de simulations de scénarios régionaux [6] a permis de conduire ce type d’étude à l’échelle de la France [16]. Appliquée aux tendances sur 30 ans des moyennes estivales de températures minimales journalières, elle révèle la détection d’un réchauffement significatif avec un niveau de confiance de 90%. Outre la révélation d’un signal de changement climatique à une échelle spatiale jusque là non traitée, l’intérêt de ce résultat est de montrer la capacité des MCR à reproduire des réponses climatiques pour partie conformes aux observations et donc augmenter la crédibilité de ces modèles.

Il convient toutefois de noter que les études de détection ne pourront pas s’appliquer dans un avenir proche aux changements de fréquence ou d’intensité de certains événements extrêmes touchant la France, comme les tempêtes ou les épisodes de pluies intenses dits « cévenols », qui affectent le Sud-Est du pays. Nous en voulons pour preuve l’observation des ces événements au cours des quarante à cinquante dernières années. La Fig. 2 reproduit le quantile 95 normalisé du vent géostrophique, calculé chaque année à partir de mesures de pressions en cinq stations météorologiques réparties en France. Elle révèle une variabilité multiséculaire du seuil de vent (5% des vents dépassent le seuil), sans qu’apparaisse de tendance sur l’ensemble de la période 1949–1999 [5]. Cet indicateur est un révélateur à la fois de la fréquence et de l’intensité des événements. L’absence de tendance nette sur le nombre de tempêtes en France a aussi été démontrée par une autre méthode par Drevetton [3]. Une analyse du nombre d’événements de pluies intenses dans le Sud-Est de la France, aussi réalisée à partir des données du réseau météorologique [9] et récemment mise à jour (Jacq, communication person-

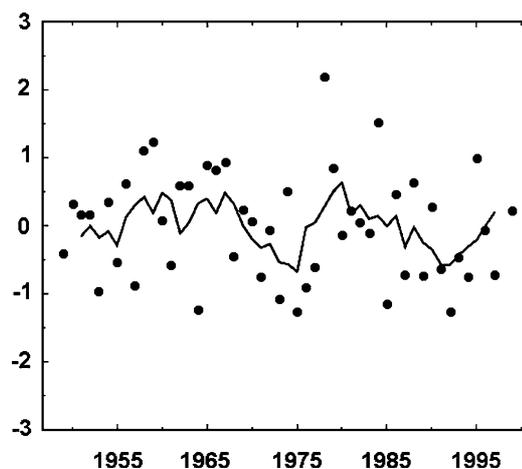


Fig. 2. Quantile 95 (seuil correspondant aux 5% de valeurs les plus élevées) normalisé du vent géostrophique calculé annuellement à partir des pressions de surface mesurées toutes les 6 h en cinq stations météorologiques françaises (Bordeaux, Bourges, Brest, Nancy, Nîmes). Les valeurs sont normalisées en enlevant la moyenne et en divisant par l’écart-type sur la période 1949–1999. La courbe représente la moyenne glissante sur des périodes de 5 ans.

Fig. 2. Standardized 95-percentile (threshold corresponding the 5% highest values) of geostrophic wind calculated annually from 6-hour surface pressure measured at five French meteorological stations (Bordeaux, Bourges, Brest, Nancy, Nîmes). The values are standardized by subtracting the mean and dividing by the root mean square over the period 1949–1999. The solid line represents the 5-year moving average.

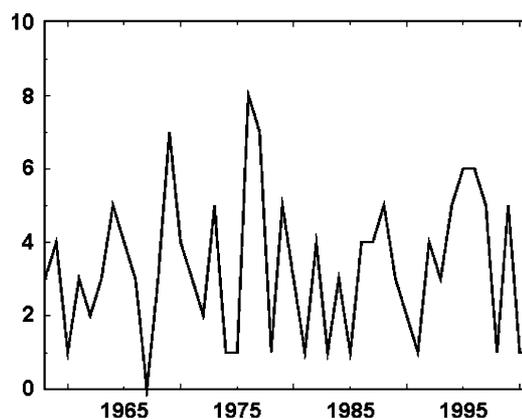


Fig. 3. Nombre annuel d’épisodes de pluies diluviennes dans le Sud-Est de la France sur la période 1958–2001. Chaque épisode correspond au dépassement du seuil de 190 mm de pluies en 24 h.

Fig. 3. Annual number of intense precipitation events in southeastern France over the period 1958–2001. Each event corresponds to precipitation more than 190 mm in 24 h.

nelle), révèle aussi l'absence de tendance significative sur le nombre de ces épisodes sur la période 1958–2001 (Fig. 3). Ces observations n'impliquent évidemment pas l'absence d'impact des changements climatiques sur la fréquence ou l'intensité des événements. Elles permettent seulement de conclure que cet impact ne peut pas être détecté dans les observations actuelles, et ne peut donc pas servir à valider les résultats des modèles.

5. Conclusion

Nous avons vu que la crédibilité des modèles simulant les évolutions climatiques futures se fonde sur l'analyse de la dispersion de résultats d'ensembles de simulations. Ces études restent cependant insuffisantes pour déterminer les incertitudes qui sont attachées à la modélisation des phénomènes climatiques et pour déterminer des probabilités d'occurrence des événements climatiques à venir. Elles doivent aussi être complétées par l'étude des mécanismes permettant d'interpréter les réponses climatiques en différentes régions et pour différentes saisons. L'existence de ces mécanismes est révélée notamment par la comparaison des changements climatiques simulés par des ensembles de modèles. La crédibilité des résultats des simulations peut ainsi être renforcée, ou au contraire limitée, en fonction de la robustesse de ces mécanismes dans l'ensemble des modèles existants, et par l'analyse d'observations sur le long terme, susceptibles d'en confirmer ou infirmer l'importance.

L'étude de la dispersion des résultats des modèles, combinée à celle des biais de ces modèles par rapport aux observations, montre qu'il n'y a pas de relation systématique entre ces biais et les changements climatiques simulés. Ce résultat s'interprète par le fait que les mécanismes expliquant le changement climatique sont spécifiques aux différentes régions et ne sont pas nécessairement les mêmes que ceux qui expliquent les erreurs systématiques des modèles. Une analyse combinée des mécanismes mis en jeu dans les erreurs systématiques et ceux qui dominent les changements climatiques régionaux s'avère nécessaire pour évaluer la crédibilité des modèles. Ce n'est que dans le cas, peu fréquent, où ces mécanismes sont identiques, que la réduction des erreurs systématiques d'un modèle peut être considérée comme un facteur renforçant sa crédibilité.

La réduction des incertitudes passe par une meilleure définition des scénarios d'émissions anthropiques, et par une amélioration de la représentation des processus qui déterminent la réponse du climat à l'échelle d'une région particulière. Les modèles climatiques régionaux, grâce à une meilleure résolution, mais aussi une représentation des processus physiques simulés adaptée à l'échelle décrite, reproduisent un climat plus réaliste à la surface des continents que leurs homologues de plus basse résolution. Cependant, en terme de changements climatiques simulés, seuls ceux qui font intervenir les processus liés à l'orographie, les contrastes continents–océans ou les caractéristiques de la surface sont susceptibles d'être plus crédibles. La détection de changements climatiques à l'échelle régionale est un champ d'investigation nouveau, susceptible de renforcer la crédibilité des modèles climatiques régionaux, comme le montre une étude sur les tendances de températures observées en France. Mais le fait que certains signaux (comme un changement des caractéristiques des tempêtes ou des événements de type « cévenol » en France) ne ressortent pas, aujourd'hui, du « bruit » de la variabilité climatique montre qu'on ne peut pas systématiquement fonder la crédibilité des changements climatiques simulés par les modèles sur leur détection dans les observations actuelles.

Références

- [1] S. Corti, F. Molteni, T.N. Palmer, Signature of recent change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes, *Nature* 398 (1999) 799–882.
- [2] J.F. Crossley, J. Polcher, P. Cox, N. Gedney, S. Planton, Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations, *Clim. Dynam.* 16 (2000) 949–961.
- [3] C. Drevet, L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950–1999, *La Météorologie* 8 (37) (2002) 46–56.
- [4] C. Frei, J.H. Christensen, M. Deque, D. Jacob, R.G. Jones, P.L. Vidale, Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.* 108D3 (2003) 4124.
- [5] S. Généros, Étude du lien entre la variabilité climatique d'un paramètre de grande échelle et l'arrivée de tempêtes sur la France, Rapport de stage de maîtrise, université Paris-7, août 2000.
- [6] A.-L. Gibelin, M. Déqué, Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Clim. Dynam.* 20 (2003) 327–339.
- [7] G.C. Hegerl, H. Von Storch, K. Hasselmann, B.D. Santer, U. Cubash, P.D. Jones, Detecting greenhouse-gas-induced cli-

- mate change with an optimal fingerprint method, *J. Climate* 9 (1996) 2281–2306.
- [8] J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C.A. Johnson, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [9] V. Jacq, *Inventaire des situations à précipitations diluviennes sur le Languedoc-Roussillon, la Provence-Alpes Côte d'Azur et la Corse sur la période 1958–1994*, Cerf Blanc, Marseille, 1994.
- [10] T.G.F. Kittel, F. Giorgi, G.A. Meehl, Intercomparison of regional biases and doubled CO₂-sensitivity of coupled atmosphere–ocean general circulation model experiments, *Clim. Dynam.* 14 (1998) 1–15.
- [11] L.O. Mearns, W. Easterling, C. Hays, Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate model scenarios. Part I: The uncertainty of spatial scale, *Climatic Change* 51 (2000) 131–172.
- [12] J.-M. Moisselin, M. Schneider, C. Canellas, O. Mestre, Les changements climatiques en France au XX^e siècle, *La Météorologie* 8 (38) (2002) 45–56.
- [13] S. Planton, Le changement climatique et la probabilité des tempêtes sur l'Atlantique Nord, *Annales des Mines, Réalités Industrielles* (août 2002) 15–19.
- [14] S. Planton, Scénarios de changement climatique et impacts sur l'hydrologie, *La Houille Blanche* 8 (2002) 73–77.
- [15] S. Planton, P. Bessemoulin, Le Climat s'emballé-t-il ?, *La Recherche* 335 (2000) 46–49.
- [16] B. Spagnoli, S. Planton, M. Déqué, O. Mestre, J.-M. Moisselin, Detecting climate change at the regional scale: the case of France, *Geophys. Res. Lett.* 29 (10) (2002).