

NOUVELLES CONNAISSANCES SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT

P. BESSEMOULIN, J.P. CERON ET J.M. MOISSELIN

*Météo-France, Direction de la Climatologie
42 Av. G. Coriolis 31057 TOULOUSE Cedex
pierre.bessemoulin@meteo.fr*

Résumé

Cet exposé introductif vise à présenter les diverses sources de variabilité du climat à diverses échelles d'espace et de temps, et à résumer les connaissances nouvelles concernant les caractéristiques du changement climatique pour une large gamme de paramètres et d'échelles, avec une attention particulière pour la France.

Abstract

This keynote presentation addresses the various phenomena driving the atmospheric variability at different time and space scales, and summarizes recent findings about the characteristics of climate change for a wide selection of parameters, with special emphasis on French climate.

Mots-clés : Changement climatique, variabilité du climat, climat de la France au XX^{ème} siècle.

Keywords : Climate change, climate variability, French climate over the XXth century.

Introduction : rappels sur la variabilité du Climat

Le Climat terrestre a connu de tous temps des variations à différentes échelles d'espace et de temps. Cette variabilité naturelle provient de différentes causes qui se manifestent à des échelles d'espace et de temps très diverses :

- en premier lieu, les variations des paramètres astronomiques terrestres : forme plus ou moins allongée de l'orbite terrestre (excentricité), inclinaison de l'axe de rotation sur elle même par rapport au plan de sa trajectoire autour du soleil (obliquité), précession des équinoxes, qui rythment en particulier la fréquence des grandes glaciations (tous les 100.000 ans) et les caractéristiques des périodes interglaciaires ;
- la variabilité de l'activité solaire aux échelles décennales à centennales, qui conditionne l'énergie reçue à la surface terrestre ;
- différentes oscillations comme l'oscillation australe (El Niño et La Niña), ou l'oscillation nord-atlantique, mettant en jeu des interactions entre océans et atmosphère, à des échelles de temps allant de quelques années à la décennie ;
- les éruptions volcaniques, qui en projetant des quantités massives d'aérosols, peuvent modifier momentanément (une année ou deux) l'énergie reçue en surface, et donc la température ;
- sans oublier bien sûr la nature turbulente et chaotique de l'atmosphère.

Le rôle des paramètres astronomiques a été démontré de façon éclatante par diverses données paléo-climatiques. Les carottes glaciaires provenant du sondage de Vostok réalisé sur les 3300 m d'épaisseur des glaces antarctiques (Petit et al., 1999) ont en particulier permis de reconstituer la température moyenne sur les 420.000 dernières années, de retrouver la signature des quatre dernières grandes glaciations, et surtout de montrer le lien étroit entre température moyenne et concentrations en gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane).

L'évolution connue des paramètres astronomiques terrestres aurait dû nous conduire vers un lent retour vers une petite glaciation sur les 6 prochains millénaires. C'est bien cette tendance qui a été observée en moyenne depuis l'an mil (Mann et al., 1999) jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle. Diverses

sources d'information montrent que depuis le début de l'ère industrielle, à compter de la moitié du XIX^{ème} siècle, non seulement cette tendance a été annihilée, mais l'atmosphère terrestre se réchauffe globalement. Ce réchauffement, non uniforme dans le temps et l'espace, chiffré à environ 0,6°C pour l'augmentation de température moyenne globale sur le XX^{ème} siècle, s'est produit à une vitesse qui a peu d'équivalents dans l'histoire du Climat, et en liaison avec des teneurs en gaz à effet de serre jamais atteintes (par exemple 360 ppm pour le CO₂, actuellement contre des maxima n'ayant vraisemblablement jamais dépassé 280 lors des 20 millions d'années passées ; 1800 ppm pour le méthane, contre 800 en 1850). Notons en passant que ce chiffre de 0,6°C n'est qu'un chiffre moyen qui cache de fortes disparités régionales et saisonnières.

Si différentes sources naturelles de variabilité ont pu influencer notablement le climat au début des 150 années considérées, il est désormais admis que, de nos jours, le forçage principal provient de l'effet de serre additionnel généré par les activités anthropiques.

1. Caractéristiques du changement climatique du début de l'ère industrielle à nos jours

C'est clairement pour le paramètre température que le changement climatique est le plus marqué, avec des impacts nets sur la diminution de l'amplitude thermique diurne, le nombre de jours de gel, les précipitations neigeuses en plaine ou moyenne montagne, la fonte des glaciers et de la banquise arctique,... Pour les précipitations, un signal significatif est également observé sur le XX^{ème} siècle, à la fois quantitativement sur les cumuls annuels (augmentation de l'ordre de 15% aux hautes latitudes, diminution en zones tropicales de l'ordre de 10%, constance ou faible augmentation aux latitudes moyennes), mais aussi sur la répartition annuelle des pluies (en général augmentation hivernale et diminution estivale).

Pour ce qui concerne les phénomènes extrêmes (tempêtes, pluies intenses, cyclones,...), le débat est relancé par les médias à l'occasion de chaque catastrophe d'origine climatique. L'état de l'art reflété dans le dernier rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur les Changements climatiques) daté de 2001 est pourtant sans ambiguïté : augmentation des pluies intenses qualifiée de « vraisemblable » aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord, mais chiffrée à seulement 2 à 4% sur le XX^{ème} siècle, faible augmentation des vagues de chaleur et des sécheresses, diminution des vagues de froid, pas d'augmentation de l'intensité et du nombre global de tempêtes, de cyclones, de tornades, d'orages ou d'épisodes de grêle.

En particulier en France (Dreveton, 2002), on observe un retour aux conditions de la fin du XIX^{ème} siècle dans l'Atlantique nord après une baisse ayant culminé vers les années 60 (Wasa Group, 1998).

Pour tous ces phénomènes, **la variabilité (forte) reste dominée par des échelles inter-décennales à multi-décennales**. L'occurrence des cyclones dans l'Atlantique nord par exemple est fortement dépendante de la phase de l'oscillation australe (El Niño et La Niña). Il est sans doute vrai par contre que notre vulnérabilité aux phénomènes extrêmes a augmenté de façon significative sur le XX^{ème} siècle, en raison de divers facteurs (accroissement de la population, concentration dans les zones urbaines, remembrement, augmentation des surfaces imperméables, disparition de zones humides, aménagements péri-urbains, constructions en zones inondables, etc.).

2. Le changement climatique en France

Pour la France, plusieurs articles de synthèse sur le changement climatique sur le territoire national ont été publiés récemment (Bessemoulin et Mestre, 2001; Moisselin, 2002 ; Moisselin et al., 2002), **reposant sur l'utilisation de longues séries homogénéisées**.

Pour la température, les chiffres à mettre en rapport avec la valeur moyenne globale annuelle de 0,6°C sont compris :

- entre 0,7°C dans le nord-est et 1,1 °C dans le sud-ouest pour la température moyenne;
- entre 0,9°C dans le nord-est et 1,5°C dans l'ouest pour les températures minimales;
- entre 0,1 °C dans le nord, et 0,9°C dans le sud pour les températures maximales.

La **figure 1** présente une synthèse des tendances saisonnières et annuelles des températures minimales et maximales réalisée à partir de 70 longues séries homogénéisées. Ces figures révèlent :

- une augmentation des températures minimales beaucoup plus marquée que les températures maximales, et donc une diminution significative de l'amplitude diurne de température. En relation avec ce qui précède, un signal marqué est également apparent sur le nombre de jours de gel, comme par exemple à Paris (**figure 2**), avec une évolution de près de 60 jours en début de siècle à moins de 30 jours actuellement, qui est loin d'être simplement une conséquence de l'urbanisation.
- une variation saisonnière marquée et un comportement très différent des températures maximales et minimales, qui présentent respectivement un gradient nord-sud et un gradient est-ouest, laissant supposer une évolution séculaire de la couverture nuageuse matinale différente selon la distance à la côte.
 - Pour l'hiver (Décembre, Janvier, Février) par exemple, les tendances de la température minimale moyenne sont assez homogènes sur l'ensemble du territoire avec une moitié Sud offrant des tendances un peu plus élevées (de 1,1 à 1,3°C) que la moitié Nord (de l'ordre de 1°C). Les températures maximales moyennes hivernales montrent un visage beaucoup plus contrasté avec des tendances très faibles dans le Nord-Est (environ 0,2°C) alors qu'elles atteignent ou dépassent le degré pour un grand quart Sud-Est ainsi que sur le Sud-Ouest. Tout cela se traduit au niveau de la température moyenne hivernale par des tendances plus faibles au Nord qu'au Sud et des poches de tendances élevées sur le Sud-Ouest et le Sud-Est (supérieures au degré).
 - Pour le printemps (Mars, Avril, Mai) et la température minimale, l'organisation du champ de tendance est clairement méridienne avec des tendances plus faibles à l'Est (descendant jusqu'à 0,3°C) et plus fortes à l'Ouest (allant jusqu'à 1,3°C sur le Nord, la Bretagne et la Gironde). Les tendances des températures maximales se séparent en deux parties bien distinctes. La moitié Nord correspond à des tendances négatives (jusqu'à -0,4°C) ou quasiment nulles alors que la moitié Sud montre des tendances positives pouvant atteindre 1°C dans les Alpes. Le bilan global sur la température moyenne est d'une part des tendances plus faibles au Nord qu'au Sud et d'autre part des tendances plus faibles au printemps qu'en hiver.
- Les tendances pour la saison estivale (Juin, Juillet, Août) ressemblent beaucoup dans leur organisation à celles observées au printemps avec en général des valeurs plus importantes pour les tendances positives.
- La saison automnale (Septembre, Octobre, Novembre) présente des tendances très marquées sur une grand quart Nord-Ouest pour la température minimale (où l'on atteint près de 2°C par siècle).

Pour les précipitations, la situation est assez différente. Si l'on dispose de 226 longues séries homogénéisées au moins centenaires, celles-ci ne recouvrent que 40 départements, et il est donc plus difficile d'effectuer une cartographie des tendances. D'autre part, l'homogénéisation peut laisser subsister des ruptures de l'ordre de 10% des cumuls annuels, ce qui est précisément l'ordre de grandeur des tendances calculées.

La plupart des séries considérées présentent des tendances à la hausse pour les cumuls annuels. L'examen de la significativité statistique de celles-ci révèle qu'aucune baisse n'est significative. Les

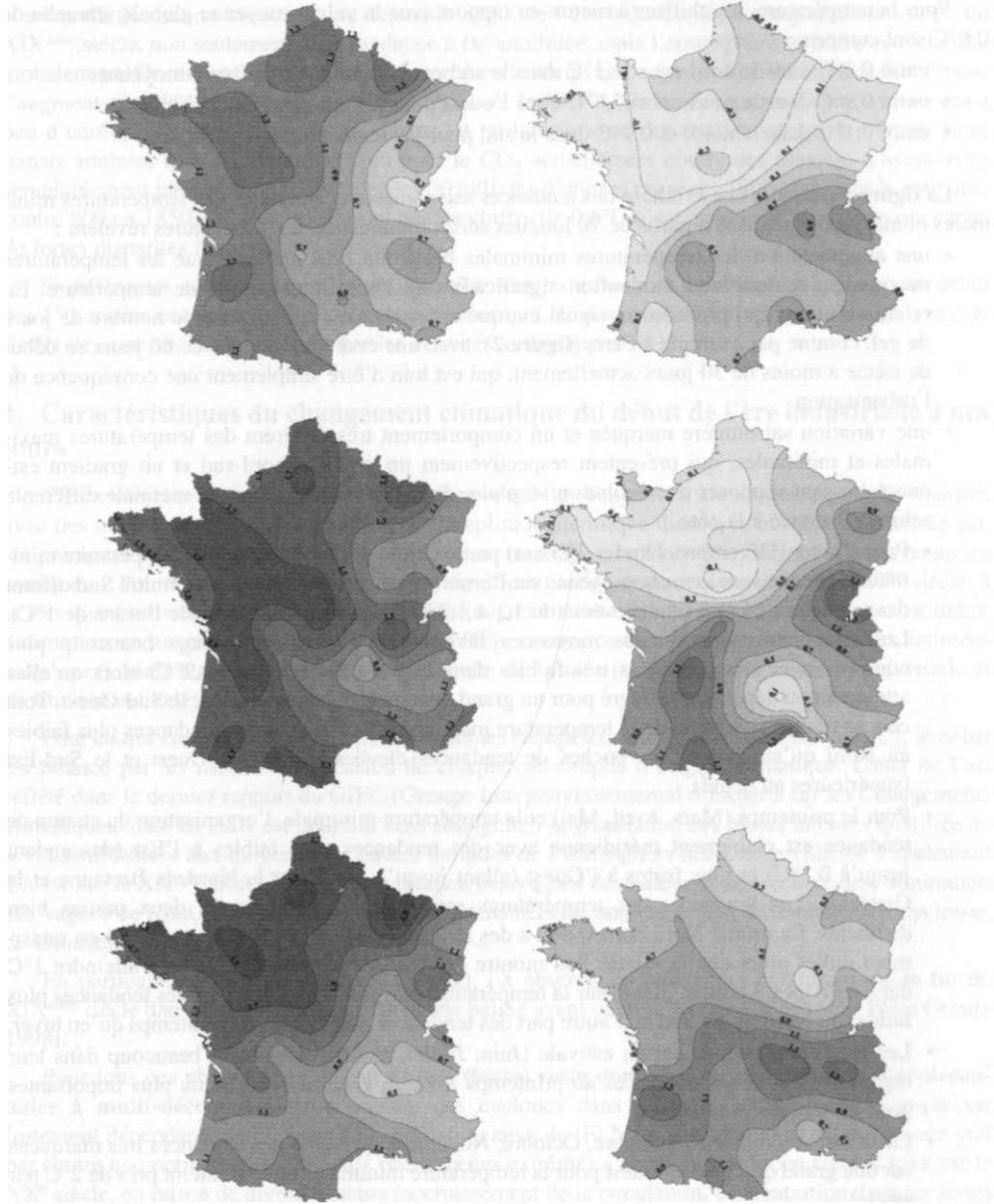


Figure 1 : Evolution séculaire sur le XX^{ème} siècle des températures minimales (gauche) et maximales (droite) :
a) printemps (haut) - b) été (milieu) - c) automne (bas).

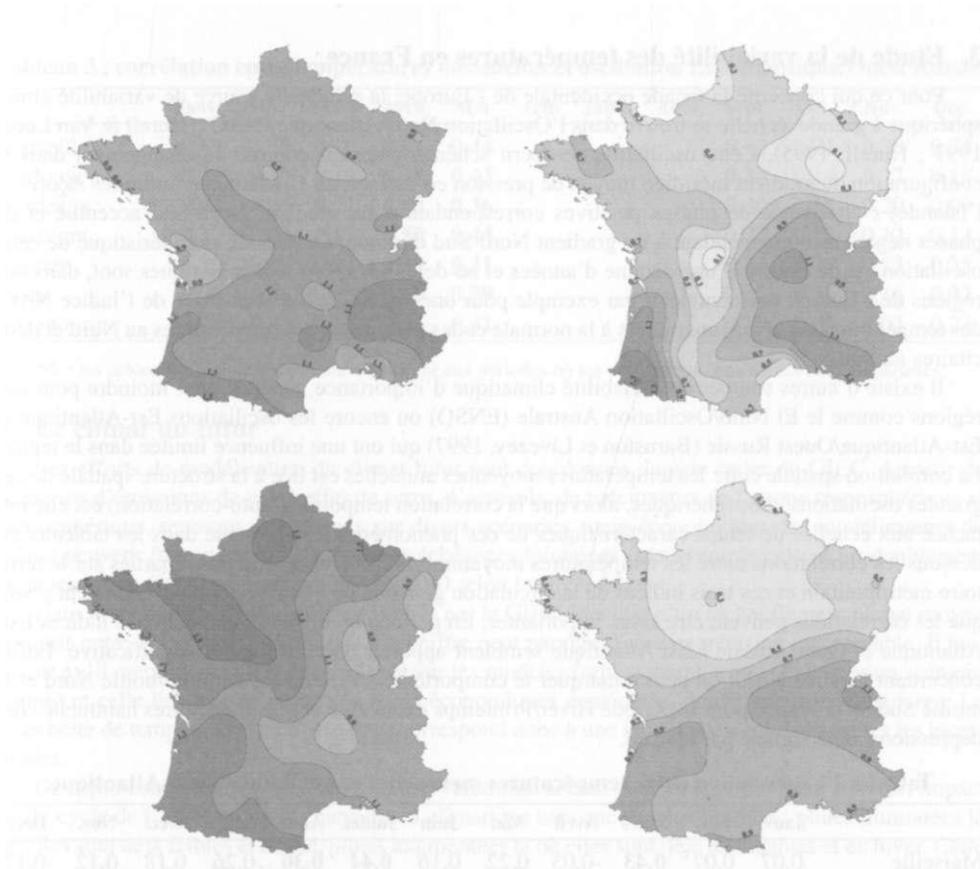


Figure 1 (suite) : Evolution séculaire sur le XX^{ème} siècle des températures minimales (gauche) et maximales (droite) : d) hiver (haut) - e) annuelle (bas).

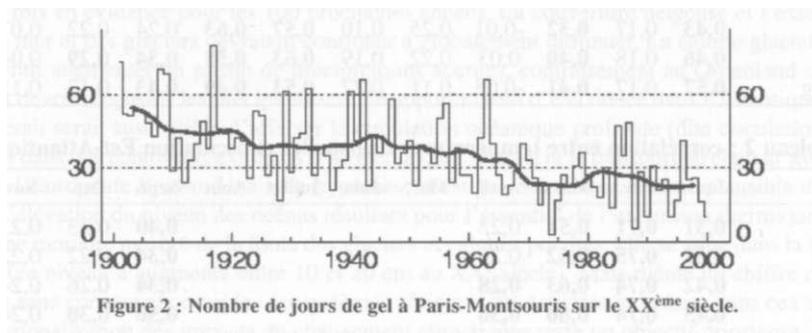


Figure 2 : Nombre de jours de gel à Paris-Montsouris sur le XX^{ème} siècle.

hausse significative concernent 0 (en été) à 35% (en hiver et au printemps) des stations selon les saisons (Moisselin, 2002).

Des efforts d'homogénéisation similaires sont engagés à Météo-France pour d'autres paramètres (pression, vitesse du vent, insolation,...).

3. Etude de la variabilité des températures en France

Pour ce qui concerne la façade occidentale de l'Europe, la principale source de variabilité atmosphérique à grande échelle se trouve dans l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) (Hurrell & Van Loon, 1997 ; Hurrell, 1995). Cette oscillation se décrit schématiquement comme un changement dans la configuration du gradient méridien moyen de pression en surface sur l'Atlantique (entre les Açores et l'Islande) : alternance de phases positives correspondant à un gradient Nord-Sud accentué et de phases négatives correspondant à un gradient Nord-Sud diminué. La période caractéristique de cette oscillation est de l'ordre d'une dizaine d'années et au-delà. Ses effets caractéristiques sont, dans nos régions de l'Europe occidentale et par exemple pour une valeur élevée et positive de l'indice NAO, des températures en hiver supérieures à la normale et des précipitations excédentaires au Nord et déficitaires au Sud.

Il existe d'autres sources de variabilité climatique d'importance généralement moindre pour nos régions comme le El Nino/Oscillation Australe (ENSO) ou encore les oscillations Est-Atlantique et Est-Atlantique/Ouest Russie (Barnston et Livezey, 1997) qui ont une influence limitée dans le temps. La corrélation spatiale entre les températures moyennes annuelles est liée à la structure spatiale de ces grandes oscillations atmosphériques, alors que la corrélation temporelle (auto-corrélation) est elle rattachée aux échelles de temps caractéristiques de ces phénomènes. On présente dans les tableaux ci-dessous les corrélations entre les températures moyennes mensuelles de stations réparties sur le territoire métropolitain et ces trois indices de la circulation générale de l'hémisphère nord. On peut y voir que les corrélations peuvent être assez importantes. En période hivernale notamment, les indices Est-Atlantique et Ouest Russie / Est Atlantique semblent apporter une information significative. Enfin, concernant l'indice NAO, on peut remarquer le comportement différencié entre la moitié Nord et la moitié Sud de la France pour la période Hiver/Printemps explicable par les trajectoires habituelles des dépressions, déjà signalé par Hurrell.

Tableau 1 : corrélation entre températures mensuelles et oscillation Nord-Atlantique.

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Marseille	0,07	0,07	0,43	-0,05	0,22	0,16	0,44	0,30	0,26	0,18	0,12	-0,17
Toulouse	0,10	0,03	0,23	-0,20	0,08	0,13	0,53	0,47	0,18	0,14	-0,02	-0,08
Bordeaux	0,24	0,05	0,22	-0,12	0,20	0,12	0,58	0,54	0,23	0,13	-0,07	0,06
Clermont	0,28	0,09	0,28	-0,14	0,18	0,18	0,47	0,38	0,31	0,09	0,01	0,15
Rennes	0,43	0,17	0,32	-0,01	0,25	0,10	0,57	0,63	0,24	0,22	0,07	0,40
Paris	0,46	0,18	0,40	0,03	0,22	0,19	0,63	0,58	0,34	0,29	0,04	0,40
Strasbourg	0,57	0,17	0,41	-0,03	0,11	0,27	0,53	0,49	0,43	0,13	0,13	0,43

Tableau 2 : corrélation entre températures mensuelles et oscillation Est-Atlantique.

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Marseille	0,31	0,71	0,51	0,23					0,40	0,23	0,23	0,53
Toulouse	0,37	0,75	0,62	0,26					0,34	0,22	0,22	0,58
Bordeaux	0,42	0,74	0,63	0,28					0,34	0,26	0,24	0,61
Clermont	0,45	0,74	0,60	0,36					0,50	0,30	0,24	0,64
Rennes	0,48	0,71	0,58	0,35					0,27	0,22	0,22	0,51
Paris	0,48	0,68	0,50	0,36					0,38	0,21	0,28	0,47
Strasbourg	0,43	0,70	0,50	0,31					0,61	0,25	0,29	0,46

Tableau 3 : corrélation entre températures mensuelles et oscillation Est-Atlantique/Ouest Russie.

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Marseille	-0,15	0,39	0,14	0,41	0,44				0,12	0,21	0,38	0,24
Toulouse	0,39	-0,37	0,19	0,48	0,43				0,33	0,14	0,27	0,15
Bordeaux	-0,44	-0,41	0,21	0,43	0,36				0,30	0,15	0,20	0,09
Clermont	-0,37	-0,45	0,17	0,50	0,44				0,23	0,12	0,12	0,13
Rennes	-0,29	-0,38	0,21	0,39	0,31				0,27	0,25	0,13	0,25
Paris	-0,26	0,36	0,25	0,49	0,39				0,23	0,24	0,16	0,32
Strasbourg	-0,24	0,42	0,15	0,46	0,41				0,10	0,06	0,03	0,23

Nb : les colonnes non renseignées correspondent aux périodes où les oscillations considérées sont inopérantes.

4. Le climat du futur

Les efforts de modélisation du climat futur sont coordonnés dans le cadre du GIEC. A partir de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols, de précurseurs de l'ozone troposphérique et stratosphérique, reposant eux mêmes sur divers scénarios socio-économiques, les modélisateurs du climat peuvent faire des projections à des échéances lointaines (par exemple celle d'un doublement de la teneur en C_0 à un horizon 2070 à 2100 selon les hypothèses).

Dans cette hypothèse, les chiffres publiés par le GIEC font état d'un réchauffement global moyen compris entre 1,4 et 5,8°C d'ici 2100. Ce chiffre peut paraître d'une imprécision inacceptable. Il faut savoir qu'il recouvre à la fois l'incertitude sur les modèles (typiquement + ou - 1°C pour un scénario donné) et celle liée aux 35 scénarios socio-économiques considérés, dont l'incertitude est large. La fourchette de température citée plus haut correspond donc à une enveloppe englobant toutes les incertitudes.

De façon concomitante, on s'attend à une variabilité accrue du climat, notamment à un fort impact sur le cycle de l'eau lorsque le changement climatique sera encore plus marqué : pluies diminuées là où elles sont déjà faibles et en été, pluies augmentées là où elles sont déjà abondantes et en hiver. Cette tendance risque donc fort d'aggraver les problèmes de ressources en eau.

L'impact du changement climatique sur les cyclones, les tornades, les tempêtes ou la mousson asiatique est encore incertain ; celui sur l'amplitude des événements des épisodes de type El Nino n'est pas mis en évidence pour les 100 prochaines années. La couverture neigeuse et l'extension des glaces de mer et des glaciers devraient continuer à globalement diminuer. La calotte glaciaire antarctique devrait augmenter en raison de précipitations accrues, contrairement au Groenland où le ruissellement devrait dépasser les précipitations. Un apport massif d'eau douce dans l'Atlantique nord qui en résulterait serait susceptible d'affecter la circulation océanique profonde (dite circulation thermohaline), et dans des conditions extrêmes d'arrêter le Gulf Stream et le transport de chaleur associé dont bénéficie l'Europe de l'ouest. Une telle hypothèse n'est pas considérée comme plausible d'ici 2100. Quant à l'élévation du niveau des océans résultant pour l'essentiel de l'expansion thermique de l'eau, et dans une moindre mesure de la fonte des glaciers et calottes polaires, elle se situe dans la fourchette 9-88 cm (ce niveau a augmenté entre 10 et 20 cm au XX^e siècle). Mais même un chiffre médian ne serait pas sans conséquence sur les écosystèmes côtiers et les activités humaines dans ces zones.

La régionalisation des impacts du changement climatiques reste un objectif prioritaire, parce que la résolution des modèles globaux ne permet en général pas de restituer très finement des influences locales comme celle des reliefs, qui sont insuffisamment décrits dans ces modèles. L'utilisation de modèles à aire limitée, couplés à un modèle global, se répand de plus en plus. En France, on tire avantage du fait que le modèle ARPEGE peut être utilisé en mode étiré (maille variable), et que le domaine d'intérêt peut de ce fait être couvert avec une résolution de l'ordre de 50 km. Les projections pour la fin du XXI^e siècle pour un domaine englobant la Méditerranée et la France, et dans l'hypothèse d'un scénario moyen du GIEC (scénario B2) ont été récemment publiées par Gibelin et Déque (2002).

Conclusion

La connaissance de l'évolution du Climat, avec séparation des composantes naturelle et anthropique a fait des progrès très significatifs ces dernières années. Concernant les données d'observations, l'utilisation de données homogénéisées constitue un pas décisif et incontournable pour caractériser le changement climatique.

Bibliographie

- BARNSTON A.G. and R.E. LIVEZEY, 1987 : Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea.Rev.*, vol. 115, p. 1083-1126.
- BESSEMOULIN P et O. MESTRE., 2001 : Le réchauffement climatique sur le siècle en France. *Lettre PIGB-PMRC*, n° 12, p. 32-34.
- DREVETON C, 2002) : Evolution du nombre de tempêtes observées en France. *La Météorologie*, n° 37, p. 46-56.
- GIBELIN, A. L. and M. DEQUE, 2002 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics* (à paraître).
- HURRELL, J.W. (1995) : Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, p. 676-679.
- HURRELL, J.W. and H. van LOON, 1997: Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *dim. Change*, 36, 301-326.
- IPCC, 2001 : *Climate change 2001: the scientific basis Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, 881 p.
- MANN M.E., R.S. BRADLEY and M.K. HUGHES, 1999 : Northern Hemisphere Temperatures during the past Millenium. Inferences, uncertainties and limitations, *Geophys. Res. Letters*, 26, p. 759-762.
- MOISSELIN J.M., 2002 : Les précipitations en France au XX^{ème} siècle. *Lettre PIGB-PMRC*, n° 13, p. 57-62.
- MOISSELIN, J.M., M. SCHNEIDER, C. CANELLAS et O. MESTRE, 2002 : Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle, *La Météorologie*, n° 38, p. 45-56.
- PETIT, J.R. et al., 1999 : Climate and atmospheric history of the past 420000 years from Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, vol. 399, p. 429-436.
- The WASA Group, 1998 : Changing waves and storms in the northeast Atlantic ? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 19, p. 741-760.