

MissTerre : Partie bilan 2006

Le projet MISSTERRE a démarré en septembre 2006.

L'action prioritaire a concerné le projet ESCRIME et la valorisation des résultats des simulations réalisées pour le 4^{ème} rapport du GIEC. Nous reportons ci-dessous les principales avancées des 4 derniers mois, en incluant aussi les éléments sur la régionalisation et le développement des modèles

ESCRIME :

Le projet ESCRIME (Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et Météo-France) a été créé pour fédérer les analyses scientifiques effectuées sur les très nombreuses simulations climatiques réalisées par la communauté française dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC. Il y a actuellement 16 projets recensés, qui couvre une large gamme de thématique. La priorité de l'année 2006 était de faire une synthèse des principaux résultats. Cette première phase d'ESCRIME comprenait :

- la mise à disposition des données simulées à l'IPSL et à Météo-France sur des serveurs DODS et au format Netcdf
- le démarrage des projets d'analyse (voir liste dans la proposition MISTERRE) et la présentation des premiers résultats lors d'une réunion à Toulouse en janvier 2006
- la finalisation avant la fin de l'année 2006 du premier jeu d'analyses
- L'organisation de journées de travail et l'assemblage des différents résultats des papiers individuels dans un livre blanc.

Le projet MISSTERRE a permis d'organiser une réunion de synthèse les 9 et 10 octobre 2006, rassemblant les personnes ayant participé aux analyses ainsi que des représentants de nos institutions, de l'ONERC et de l'IDDRI. L'ensemble de l'activité a été regroupée selon 8 thèmes principaux : 1. Scénarios globaux, 2. Sensibilité climatique, 3. Modes de variabilité, 4. Régionalisation et extrêmes, 5. Cycle hydrologique, 6. Régions polaires et cryosphère, 7. Cycle du carbone, 8. Détection et attribution. Les responsables des différents thèmes étaient invités à présenter la synthèse des résultats pour le thème. Les formes écrites de ces synthèses constituent la trame du rapport qui sera finalisé fin 2006 en vue d'une large diffusion des résultats début 2007. Ce rapport comprendra également un résumé destiné à une diffusion dans un cercle plus large que celui de la communauté scientifique. Les documents sont disponibles auprès de Laurent Terray (laurent.terray@cerfacs.fr).

Ces journées de synthèse ont aussi été l'occasion de discuter les éléments qui figureront dans la plaquette qui sera diffusée au moment de la réunion du groupe 1 du GIEC à Paris (29janvier-1^{er} février 2006). A l'issue des journées, nous avons fait une proposition de texte et de figure à Pascale Delécluse et Sylvie Joussaume respectivement responsable de la partie groupe 1 et de l'ensemble de la plaquette. Ce texte reprend les principales conclusions des projets d'analyse et est joint à la fin de ce document.

Publications 2006 ayant contribué à ce travail :

- Bony, S., R. Colman, V.M. Kattsov, R.P. Allan, C.S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M.M. Holland, W. Ingram, D.A. Randall, B.J. Soden, G. Tselioudis, and M.J. Webb. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes ? J. Climate, 19(15) :3445-3482, August 2006.
- Boulangier, J.-P., Fernando Martinez and Enrique C. Segura, Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 2: Precipitation mean state and seasonal cycle in South America, Clim. Dyn., sous presse

- Boulanger, J. P., F. Martinez, and E. C. Segura, 2006: Projection of future climate change conditions using IPCC simulations, neural networks and Bayesian statistics. Part 1: Temperature mean state and seasonal cycle in South America. *Climate Dynamics*, **27**, 233-259.
- Braconnot, P., F. Hourdin, S. Bony, J. L. Dufresne, J. Y. Grandpeix, and O. Marti, soumis: Impact of different convective cloud schemes on the simulation of the tropical seasonal cycle with a coupled ocean-atmosphere model. *climate dynamics*.
- Collins, W. D., V. Ramaswamy, M. D. Schwarzkopf, Y. Sun, R. W. Portmann, Q. Fu, S. E. B. Casanova, J.-L. Dufresne, D. W. Fillmore, P. M. D. Forster, V. Y. Galin, L. K. Gohar, W. J. Ingram, D. P. Kratz, M.-P. Lefebvre, J. Li, P. Marquet, V. Oinas, Y. Tsushima, T. Uchiyama, and W. Y. Zhong. Radiative forcing by well-mixed green- house gases : Estimates from climate models in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4). *J. Geophys. Res.-Atm.*, 111 :D14317, doi: 10.1029/2005JD006713, August 2006.
- Boé J., L. Terray, F. Habets and E. Martin, 2006: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, **in press**.
- Déqué, M., Jones, R.G., Wild, M., Giorgi, F., Christensen, J.H., Hassell, D.C., Vidale, P.L., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., de Castro, M., Kucharski, F., van den Hurk, B., 2005. Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Clim. Dyn.*, **25**, 653-670.
- Déqué, M., 2006: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, in press.
- Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M., van den Hurk, B., 2006. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, in press.
- Douville, H., 2006: Detection-attribution of global warming at the regional scale: How to deal with precipitation variability? *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, **33**, -.
- Douville, H., D. Salas-Melia, and S. Tyteca, 2006: On the tropical origin of uncertainties in the global land precipitation response to global warming. *Climate Dynamics*, **26**, 367-385.
- Dufresne, J.-L. D. Salas y Melia, S. Denvil, S. Tyteca, O. Arzel, S. Bony, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, A. Caubel, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, L. Fairhead, T. Fichet, M.-A. Foujols, P. Friedlingstein, J.-F. Gueremy, F. Hourdin, A. Idelkadi, C. Levy, G. Madec, P. Marquet, O. Marti, I. Musat, S. Planton, and J.-F. Royer. Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, à paraître nov. 2006.
- Guilyardi, E., 2006: El Nino-mean state-seasonal cycle interactions in a multi-model ensemble. *CLIMATE DYNAMICS*, **26**, 329-348.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J. L. Dufresne, L. Fairhead, M. A. Filiberti, P. Friedlingstein, J. Y. Grandpeix, G. Krinner, P. Levan, Z. X. Li, and F. Lott, 2006: The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Climate Dynamics*, **27**, 787-813.
- Krinner, O. Magand, I. Simmonds, C. Genthon, and J.-L. Dufresne. Simulated antarctic precipitation and surface mass balance of the end of the 20 th and 21 st centuries. *Clim. Dyn.*, DOI :10.1007/s00382-006-0177-x, 2006.
- Leloup, J., Lengaigne, M., Boulanger J.P., 2006: Assessing the spatial characteristics of ENSO variability in the IPCC-AR4 models using a neural networks method, soumis.
- Lengaigne, M., J. P. Boulanger, C. Menkes, and H. Spencer, 2006: Influence of the seasonal cycle on the termination of El Nino events in a coupled general circulation model. *Journal of Climate*, **19**, 1850-1868.
- Lin, J.-L., G.N. Kiladis, B.E. Mapes, K.M. Weickmann, K.R. Sperber, W. Lin, M.C. Wheeler, S.D. Schubert, A. Del Genio, L.J. Donner, S. Emori, J.-F. Gueremy, F. Hourdin, P.J. Rasch, E. Roeckner, and J.F. Scinocca 2006. Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: Convective signals. *J. Climate* **19**, 2665-2690.
- Williams, K. D., M. A. Ringer, C. A. Senior, M. J. Webb, B. J. McAvaney, N. Andronova, S. Bony, J. L. Dufresne, S. Emori, R. Gudgel, T. Knutson, B. Li, K. Lo, I. Musat, J. Wegner, A. Slingo, and J. F. B. Mitchell. Evaluation of a component of the cloud response to climate change in an intercomparison of climate models. *Climatic Dynamics*, Vol. 26, pp. 145-165, DOI: 10.1007/s00382-005-0067-7, February 2006
- Swingedouw, D., L. Bopp, A. Matras, and P. Braconnot, submitted: Influence of the Atlantic Meridional Overturning Circulation on the CO2 uptake in Century-Scale scenarios. *Geophysical Research Letters*.
- Swingedouw, D., P. Braconnot, P. Delecluse, E. Guilyardi, and O. Marti, submitted: Mechanisms of AMOC response to changes in surface buoyancy forcing under global warming in the IPSL-CM4 model. *Climate Dynamics*.

Swingedouw, D., P. Braconnot, and O. Marti, 2006: Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. *Geophysical Research Letters*, **33**, -.

Régionalisation :

Lors de la première année du projet MISSTERRE, les questions 1. et 2. (cf. projet, section 2.2) ont été abordées (pour le climat présent uniquement) grâce aux simulations ENSEMBLES et aux simulations de préparation du projet CECILIA tant au CNRM que chez les partenaires ALADIN-Climat (République Tchèque, Hongrie, Bulgarie). Cette étude et son extension aux scénarios futurs seront poursuivies dans la suite du projet.

La question 3. (cf. projet, section 2.2) a également été abordée en comparant ARPEGE-Climat zoomé sur l'Europe au même modèle mais couplé à OPA-Méditerranée (projet CYPRIM). Dans un scénario de changement climatique, un impact non-négligeable du couplage est obtenu. Cet impact semble passer par une simulation plus réaliste de la température de la mer Méditerranée par le modèle couplé régional. Un article a été soumis sur ce sujet (Somot et al. 2006).

Références 2006 sur cette thématique:

- Somot S., Sevault F., Déqué M., Crépon M. (2006) 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean regional Climate Model. *Global and Planetary Change* (soumis).
- Somot S., Sevault F., Déqué M. (2006) Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. *Climate Dynamics*, Volume 27, Numbers 7-8, December, 2006, pp. 851-879, DOI :10.1007/s00382-006-0167-z.
- Ulbrich U., W. May, P. Lionello, J.G. Pinto, S. Somot (2006) The Mediterranean Climate Change Under Global Warming (chapter 8). In: *Mediterranean Climate Variability*, Lionello, P. and Malanotte, P. and Boscolo, R.(eds), Elsevier B.V, pp. 399-415.
- Li L., Bozec A., S. Somot, K. Béranger, P. Bouruet-Aubertot, F. Sevault, M. Crépon (2006) Regional atmospheric, marine processes and climate modelling (chapter 7). In: *Mediterranean Climate Variability*, Lionello, P. and Malanotte, P. and Boscolo, R.(eds), Elsevier B.V., pp. 373-397.
- Jacob D., Bärring L., Christensen O.B., Christensen J.H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Sánchez E.S., Schär C., Seneviratne S.I., Somot S., van Ulden A., van den Hurk B. (2006) An inter-comparison of regional climate models for Europe: Model performance in Present-Day Climate. *Climatic Change* (accepté).

Evolution du modèle du CNRM

Une nouvelle version du modèle climatique, incluant désormais l'effet indirect des aérosols sulfatés et améliorant la conservation de l'énergie aux interfaces de couplage vient d'être mise au point et sera utilisée pour réaliser de nouvelles simulations climatiques dans le cadre du projet européen FP6/ENSEMBLES.

Pour ce qui concerne la mise au point du futur système CNRM-CM4 destiné à être utilisée pour le prochain exercice du GIEC, un nouveau noyau du système terre comprenant ARPEGE-Climat version 4 et le modèle NEMO de l'IPSL couplé par le coupleur OASIS du CERFACS est actuellement en cours d'évaluation en collaboration entre le CNRM et le CERFACS. La version 4 d'ARPEGE diffère principalement de la précédente par le traitement de processus physiques (cf section 2.3 du projet). La méthodologie consiste à réaliser des simulations couplées multidécennales comparées aux observations et aux résultats de simulations atmosphériques forcées avec la même version de la composante atmosphérique. Différentes versions des paramétrisations physiques sont testées (version pronostique de l'eau condensée nuageuse et précipitante, version pronostique de l'énergie cinétique turbulente, ...) et des expériences de sensibilité à différents paramètres ont été réalisées (coefficient

d'échange turbulent à la surface de l'océan, profil vertical du seuil d'auto-conversion pour l'eau solide, ...).

En parallèle, le couplage au sein de MOCAGE de la partie aérosols avec la chimie du soufre mentionné dans le projet soumis en 2006 est achevé et produit désormais des résultats satisfaisants.

Evolution du modèle de l'IPSL

Les développements de la version parallèle du modèle ont bien progressé. Une version de référence parallèle va être mise en service début 2007. Ce travail se fait en lien avec le projet ANR CICLE.

Une nouvelle version physique du modèle, incluant des modifications du modèle de sol est en cours de définition. Les analyses portent sur l'amélioration de la représentation de la mousson (avancée vers le nord en Afrique et au nord de l'Inde). Cette nouvelle version servira de références pour les simulations prévues pour le projet ENSEMBLES et qui incluront le cycle du carbone.

Afin de permettre de nouvelles implémentations de paramétrisations de flux de surface, un travail de réécriture de la couche limite du modèle d'atmosphère LMDz a été initié.

Les étapes préliminaires préparant le couplage climat-aérosols sont bien avancées. La réalisation de ces simulations couplées sera une priorité pour 2007. Elle permettront de quantifier dans le système couplé, les rétroactions liées aux différentes sources d'aérosols, dans un système où l'effet direct et indirect des aérosols est considéré.

Contribution ESCRIME à la plaquette du WG1-GIEC

Contributeurs : Sandrine Bony, Laurent Bopp, Pascale Braconnot, Patricia Cadule, Christophe Cassou, Michel Déqué, Hervé Douville, Jean-Louis Dufresne, Pierre Friedlingstein, Christophe Genthon, Eric Guilyardi, Laurent Li, Serge Planton, Jean-François Royer, David Salas, Pascal Terray, Laurent Terray

A. Modélisation globale et évolution du climat

Dans le cadre de la préparation du 4^e rapport du GIEC, le groupe de travail sur les modèles couplés (WGCM en anglais) du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP en anglais) a lancé en 2004, sous les auspices du GIEC, une action d'envergure pour encourager les équipes de modélisation à réaliser des simulations d'évolution du climat selon un protocole précis. Les résultats de ces simulations devaient être écrits selon un format standard et mis à disposition de l'ensemble de la communauté scientifique afin d'encourager les analyses croisées entre plusieurs modèles. Pour la première fois, les équipes françaises ont réalisé l'ensemble des simulations requises et ont ainsi pu contribuer plus fortement à la préparation du rapport.

La France possède deux modèles climatiques, l'un développé par Météo-France et le CERFACS, l'autre par l'IPSL, qui diffèrent principalement par leur composante atmosphérique. Depuis le précédent rapport du GIEC en 2001 toutes les composantes de ces modèles climatiques ont été améliorées: l'atmosphère (représentation de la convection, des nuages, des aérosols et de l'orographie), l'océan (formulation en surface libre), la glace de mer (rhéologie) et les surfaces continentales (utilisation des sols). La résolution des modèles a été accrue et le couplage entre les composantes a été amélioré. Enfin plusieurs travaux ont été entrepris pour coupler ces modèles climatiques à des modèles de chimie, d'aérosols, des cycles biogéochimiques ...

Les simulations réalisées pour le GIEC couvrent l'évolution du climat de 1860 à nos jours, ainsi que des projections pour le 21^{ème} siècle (Fig. A1). Pour le 20^{ème} siècle, les tendances des températures simulées par les modèles sont cohérentes avec les observations aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle de la France. De nombreuses études ont été réalisées pour caractériser et évaluer les qualités et les limites des modèles aussi bien en termes d'état moyen que de variabilité, en se comparant aux observations récentes. Pour le futur et pour le scénario SRES-A2 (scénario de croissance continue des émissions), les deux modèles simulent une évolution des températures assez semblable (Fig.A1 et A2). Pour les précipitations par contre, les divergences sont plus importantes, notamment au dessus des continents, et sur la distribution géographique du changement des précipitations.

B. Rétroactions et variabilité climatique

- ***Rétroaction et nuages***

Les modèles climatiques divergent dans l'ampleur du réchauffement global de la Terre qu'ils prévoient en réponse à un doublement du CO₂ atmosphérique. Il est reconnu depuis longtemps que cette incertitude provient avant tout des différences inter-modèles dans la réponse radiative des nuages au changement climatique. Le développement de nouvelles méthodologies d'analyse des mécanismes physiques de rétroaction dans les modèles climatiques a permis de montrer que c'est principalement la réponse des nuages de couche limite (stratus, stratocumulus et cumulus) qui est au cœur de ces incertitudes (Fig. B1). Ceci

ouvre la voie à de nouvelles stratégies d'évaluation des nuages et de leur sensibilité dans les modèles de climat.

- ***Cycle du carbone***

La possibilité d'une rétroaction positive entre changement climatique anthropique et cycle du carbone a été mise en évidence depuis peu : l'évolution future du climat pourrait diminuer de façon drastique l'efficacité des puits naturels, biosphère continentale et océans, à absorber le CO₂ anthropique avec pour conséquence une accélération de l'augmentation du CO₂ et une amplification du changement climatique. Les estimations à l'aide du modèle couplé climat-carbone de l'IPSL montrent que pour le scénario SRESA2, cette rétroaction pourrait amplifier l'augmentation du CO₂ de 35 ppm en 2100. Les études menées dans le cadre d'un projet international de comparaison de modèles couplés climat-carbone, coordonné par l'IPSL, ont montré que cette amplification, toujours positive, variait entre 20 et 200 ppm en 2100. A cela pourrait correspondre un réchauffement induit de 1.5°C supérieur aux estimations faites à l'aide des modèles climatiques traditionnels (Fig. B2).

- ***Cycle hydrologique***

La réponse des précipitations aux forçages anthropiques, bien que cruciale pour de nombreuses études d'impacts du changement climatique, demeure encore incertaine dans de nombreuses régions. Elle est en effet plus difficile à prévoir que celle des températures pour de multiples raisons. Au delà des inconnues liées aux différents scénarios d'émissions, qui jouent principalement sur l'amplitude des anomalies simulées, les projections demeurent très variables d'un modèle à l'autre, y compris à l'échelle globale continentale (Fig. B3). Parmi les diverses méthodes envisageables pour contraindre la réponse des modèles, la validation de la variabilité interannuelle du cycle hydrologique et de ses relations avec les températures de surface de la mer semble une piste intéressante à explorer (Fig. B4).

- ***Modes de variabilité***

La variabilité climatique simulée et son changement sous l'action anthropique se caractérise par une grande diversité entre modèles. Cette disparité peut s'expliquer par des interactions spatio-temporelles différentes en particulier entre la variabilité interannuelle de type ENSO et le cycle saisonnier dans le Pacifique Tropical, l'activité intra-saisonnière de l'atmosphère tropicale etc. Elle s'explique aussi par la capacité des modèles à simuler correctement les téléconnexions ENSO qui ont tendance à être surestimées, dominant alors la variabilité des moussons (Afrique, Amérique du Sud etc.) voire des latitudes extratropicales. Les réponses des modèles au forçage anthropique, pour le cycle hydrologique en particulier, semblent être contrôlées en grande partie par la nature de ces téléconnexions ENSO. L'analyse des scénarios montrent que les caractéristiques de l'ENSO ne changent pas en climat perturbé (Fig. B5). Les changements aux moyennes et hautes latitudes se caractérisent par une dynamique plus zonale se projetant sur la phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique sur l'Europe.

- ***Cryosphère***

Il est crucial de comprendre l'évolution actuelle et future des glaces continentales et marines. Des observations satellitaires montrent que les premières contribuent par leur fonte à une élévation du niveau des océans de près d'un mm/an sur la période 1993-2005, qui s'ajoute aux 2mm/an dus à la dilatation thermique des océans en phase de réchauffement. Pour la fin du 21^{ème} siècle, les modèles indiquent que la fonte de la calotte groenlandaise devrait nettement s'accroître. L'élévation associée du niveau de la mer devrait cependant être modérée en raison d'une augmentation de l'accumulation de neige sur l'Antarctique, cohérente avec le

réchauffement des températures sur cette région. La glace de mer quant à elle est actuellement en régression rapide, et selon les modèles climatiques les plus récents cette tendance devrait se poursuivre : ainsi en été, l'Océan Arctique pourrait être totalement libre de glace à la fin du 21^{ème} siècle (Fig. B6).

C. Régionalisation et détection du changement climatique

- ***Régionalisation et extrêmes***

Une évaluation de l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes de vent, de température et de précipitations sur la France a été réalisée en utilisant des simulations à haute résolution sur l'Europe par les modèles de l'IPSL et du CNRM sous l'hypothèse du scénario A2. L'accent a été mis sur la fréquence des vagues de chaleur, des tempêtes et les phénomènes de pluies abondantes ou de sécheresses sur le territoire métropolitain. En outre l'impact sur la fréquence des cyclones tropicaux dans l'Atlantique Nord a été étudié. Trois approches ont été utilisées pour évaluer l'impact du changement climatique : l'approche directe qui utilise directement les variables du modèle, l'approche statistique qui établit sur les observations une relation empirique entre les variables observées de grande échelle et le risque météorologique associé et l'approche dynamique qui prend une situation météorologique dans son ensemble sur l'Atlantique Nord et l'Europe un jour donné et identifie les phénomènes extrêmes associés. Les résultats montrent une réponse très claire de l'augmentation des vagues de chaleur (Fig. C1), une augmentation modérée du risque de forte pluie l'hiver, et un impact quasi négligeable sur les vents forts. La réponse de la fréquence des cyclones dépend de l'hypothèse sur l'évolution de la température des océans, mais les précipitations associées aux cyclones sont en augmentation.

- ***Détection et attribution***

Les études menées au sein de la communauté française sont les premières à suggérer qu'il est possible de détecter, dans les observations des températures minimales d'été en France, une empreinte spatiale du changement climatique d'origine anthropique à des échelles sous-régionales (Fig. C2). Les travaux d'attribution montrent que la majeure partie de ce réchauffement est dû à l'action combinée des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. Les analyses réalisées semblent indiquer que les non linéarités entre l'eau du sol et la température, via les changements d'évapotranspiration, sont responsables de la structure spatiale du réchauffement. D'autre part, les études sur les précipitations montrent qu'il est également possible de détecter un signal anthropique sur les tendances hivernales des dernières décennies. La séparation du signal sur les précipitations en une partie dynamique d'échelle régionale et un résidu, montrent que cette composante dynamique capture presque complètement la tendance observée.

Figures ESCRIME

Figure A1

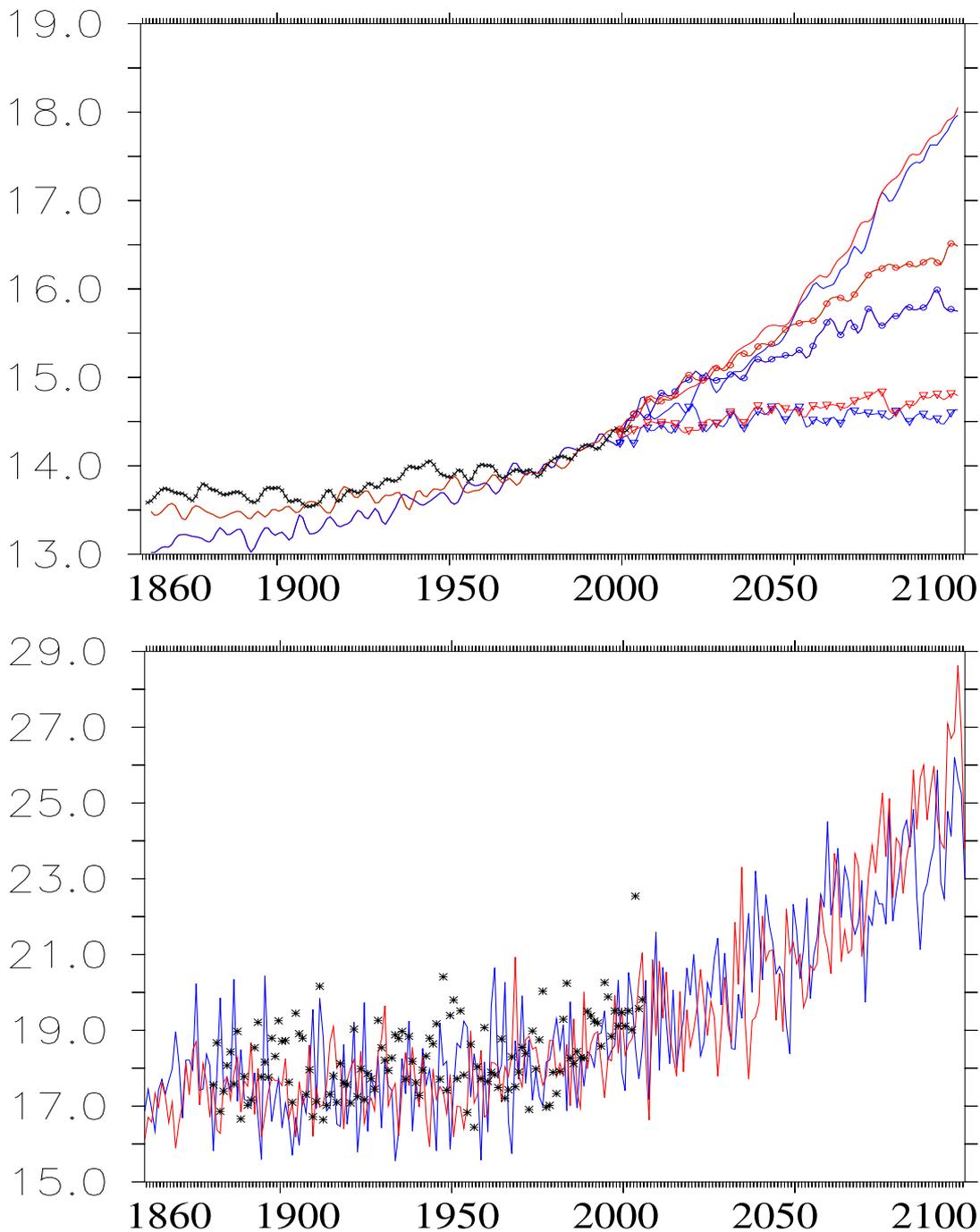


Figure A1: *En haut:* Evolution de la température moyenne de surface du globe ($^{\circ}\text{C}$) observée (en noir, de 1860 à 2004), et simulée par les modèle du CNRM (en bleu) et de l'IPSL (en rouge). Après l'an 2000, on utilise soit le scénario SRES-A2 (trait continu), soit le scénario SRES-B1 (trait avec cercle), soit on maintient la concentration de CO_2 constante (trait avec triangle). Les observations sont celles compilées par le CRU [Jones et Moberg, 2003]. *En bas :* Evolution de la température moyenne ($^{\circ}\text{C}$) durant les 3 mois d'été (juin à août) en France métropolitaine observée (en noir, de 1880 à 2005), et simulée par les modèle du CNRM (en bleu) et de l'IPSL (en rouge). Après l'an 2000, on utilise soit le scénario SRES-A2. L'été 2003 est bien visible. Les observations proviennent de Météo France.

Figure B1

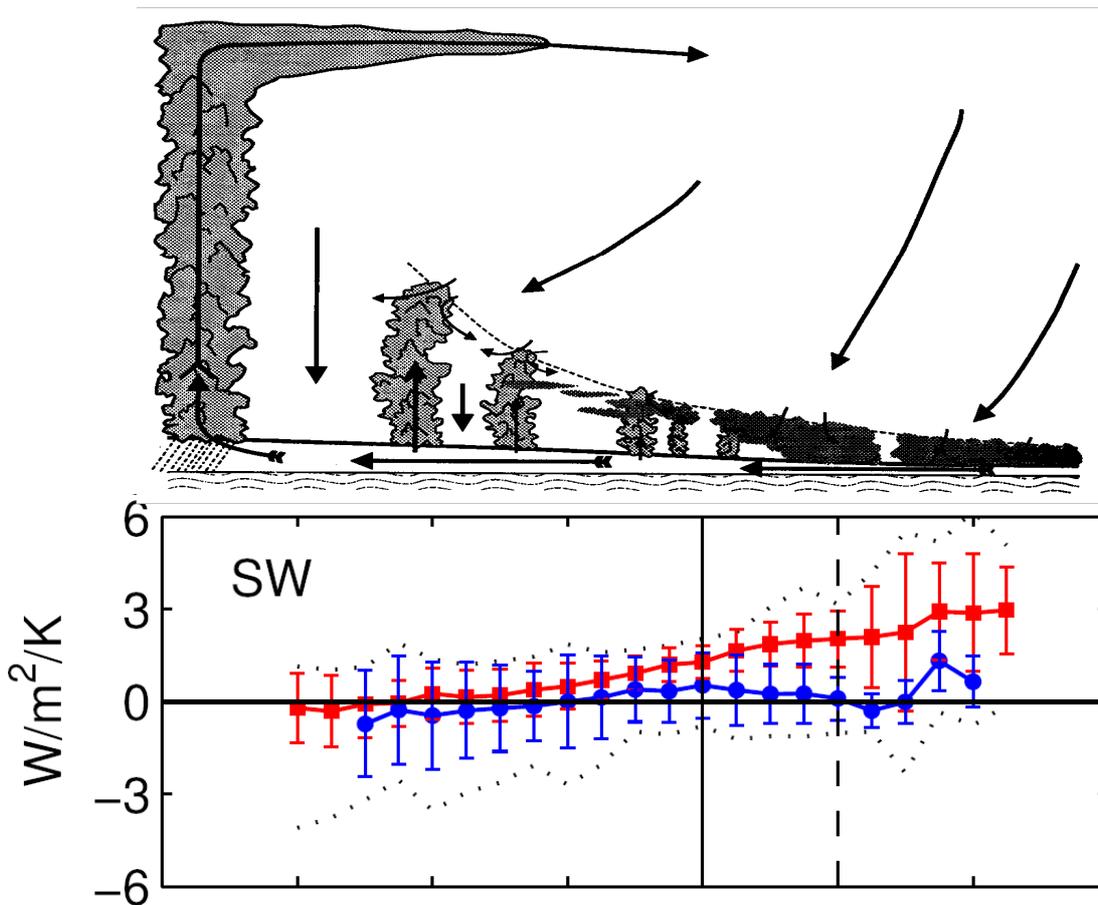


Figure B1: Sensibilité du forçage radiatif ondes-courtes des nuages tropicaux au réchauffement climatique dans différents régimes de la circulation atmosphérique, associés à différents types de nuages dominants (une sensibilité positive correspond à une diminution de la réflectivité du rayonnement solaire par les nuages). C'est dans les régimes de subsidence atmosphérique (régimes où la vitesse verticale de grande échelle est positive), caractérisés par la présence de nuages bas du type stratus, stratocumulus ou petits cumulus, que la réponse radiative des nuages au réchauffement diffère le plus entre les modèles climatiques sensibles (en rouge, moyenne des simulations de modèles prédisant un fort réchauffement climatique) et les modèles les moins sensibles (en bleu, modèles prédisant un réchauffement climatique moindre). (Adapté de Bony et Dufresne, *Geophys. Res. Lett.*, 2005, voir aussi Bony et al. 2006, Webb et al., 2006)

Figure B2

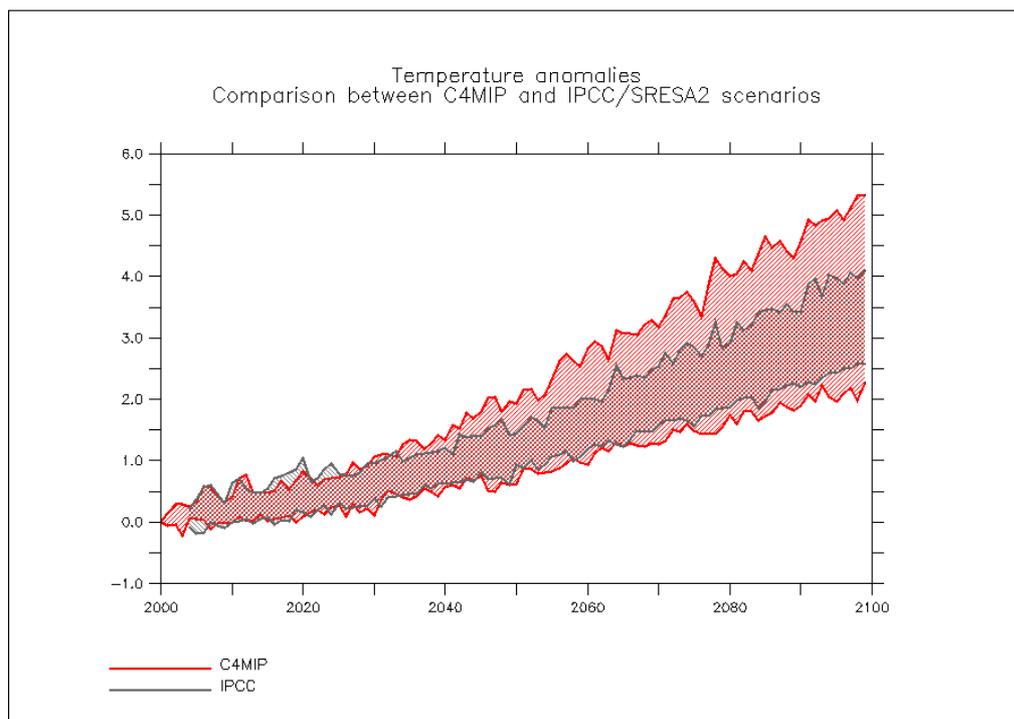
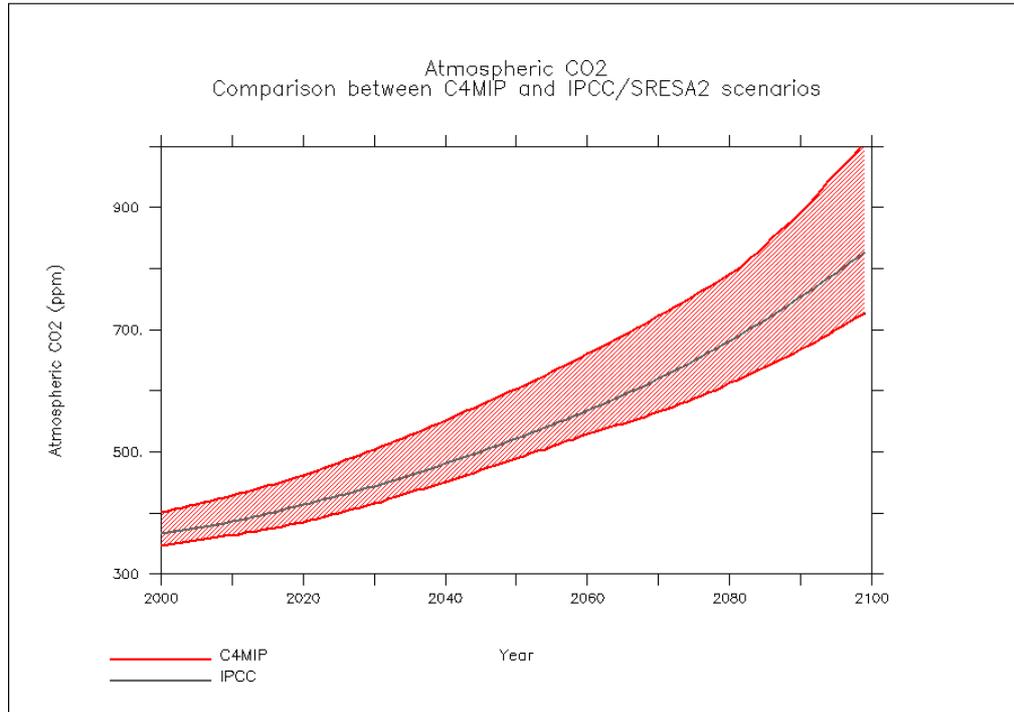


Figure B2 : dispersion de la concentration en CO₂ pour les simulations C4MIP avec cycle du carbone autour du scénario SRES-A2 (*en haut*). Anomalies de température globale pour les scénarios IPCC et C4MIP pour le scénario SRES-A2 (*en bas*)

Figure B3

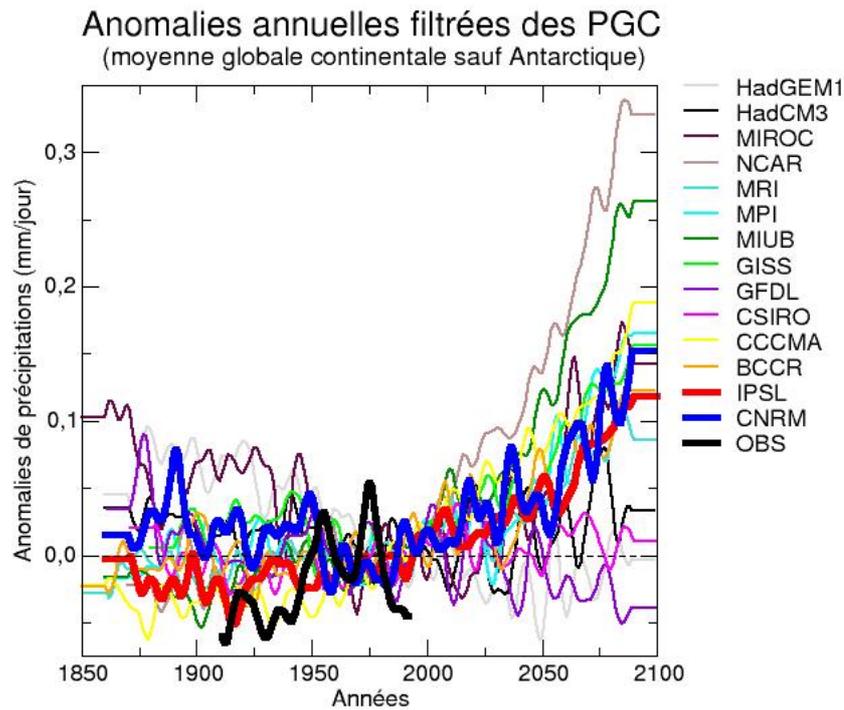


Figure B3: Evolution comparée des anomalies annuelles de précipitations globales continentales (PGC) dans les simulations du 20^{ème} siècle et les scénarios A2 de 14 modèles (dont les modèles français du CNRM et de l'IPSL) et dans les observations du CRU TS 2.1. Les anomalies sont filtrées (fréquence de coupure à 10 ans) et sont estimées relativement à la période 1971-2000. Elles montrent une forte divergence des scénarios du 21^{ème} siècle. Chaque courbe correspond à une simulation unique et les évolutions constatées au cours du 20^{ème} siècle, bien qu'elles témoignent de comportements contrastés, doivent être interprétées prudemment en raison de la diversité et de la relative faiblesse des forçages anthropiques imposés.

Figure B4

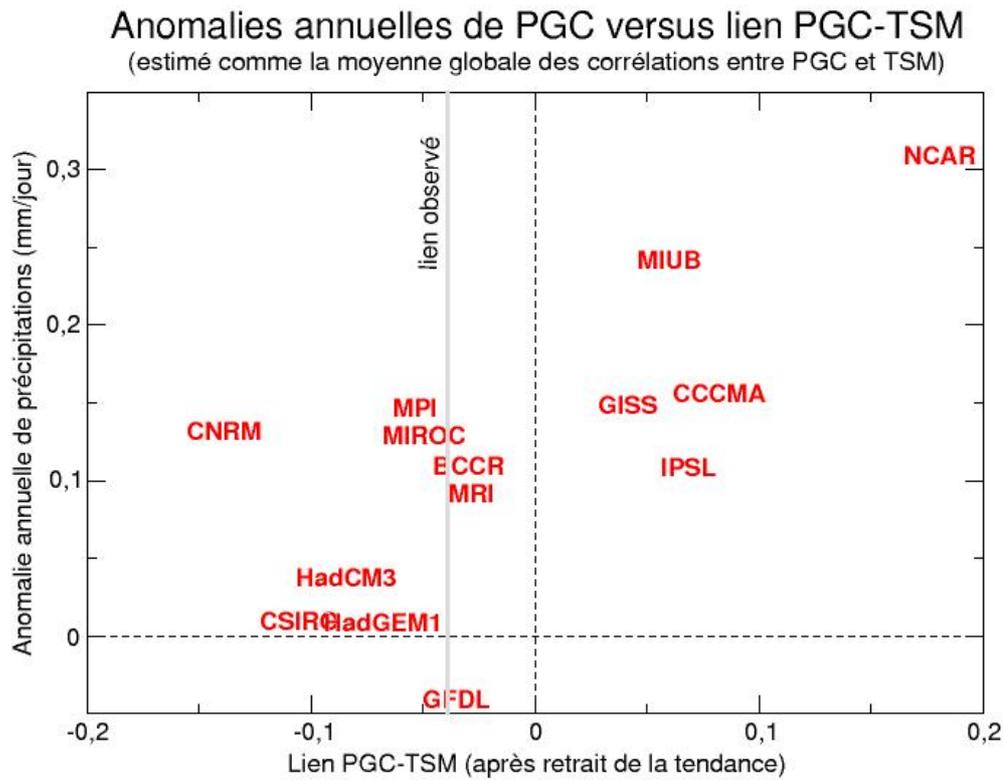


Figure B4: Mise en perspective des anomalies annuelles des précipitations globales continentales (PGC) dans 14 modèles en fonction d'un indicateur du lien interannuel qui existe entre PGC et les températures de surface de la mer. En ordonnée, les anomalies sont estimées sur les 30 dernières années du scénario A2 relativement à la période 1971-2000. En abscisse, le lien interannuel est estimé comme la moyenne globale des corrélations en points de grille avec les températures de surface de la mer après retrait de la tendance. Le nuage de points suggère qu'il existe un continuum entre la sensibilité des PGC aux échelles interannuelles et multi-décennale. La barre verticale en grisé indique l'intensité du lien interannuel observé et suggère que les réponses hydrologiques les plus fortes pourraient être exagérées.

Figure B5

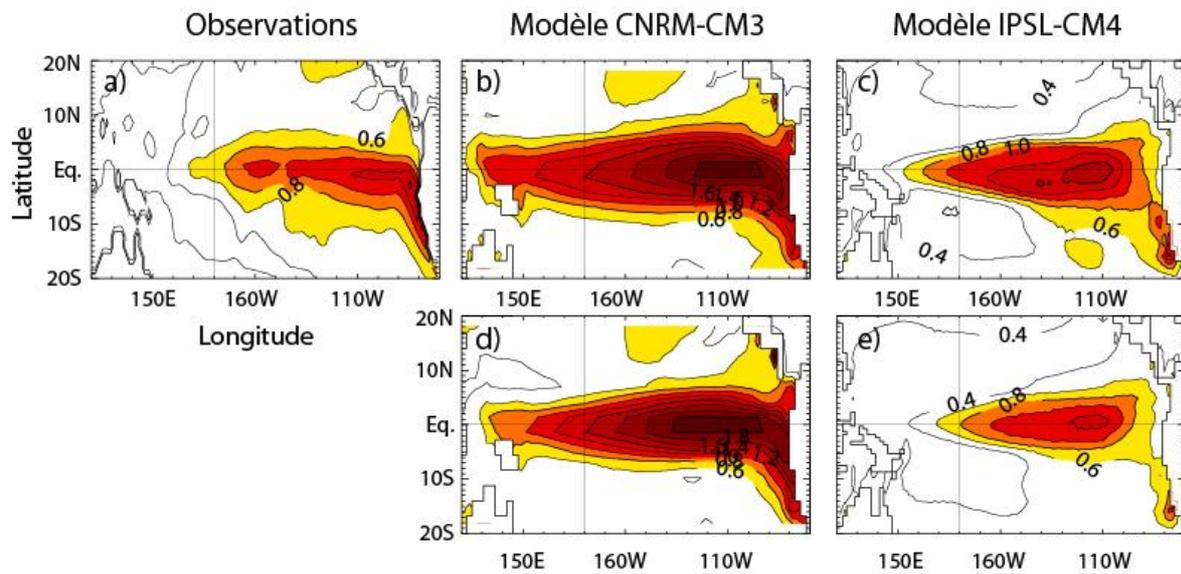


Figure B5 : Structure de la variabilité de type El Niño dans l'océan Pacifique tropical (écart type de température de surface de la mer en degrés. Celsius). a) observations, b) CNRM-CM3 en climat actuel, c) IPSL-CM4 en climat actuel, d) CNRM-CM3 en 2100 (scénario IPCC SRES A1B), e) IPSL-CM4 en 2100 (scénario IPCC SRES A1B).

Figure B6

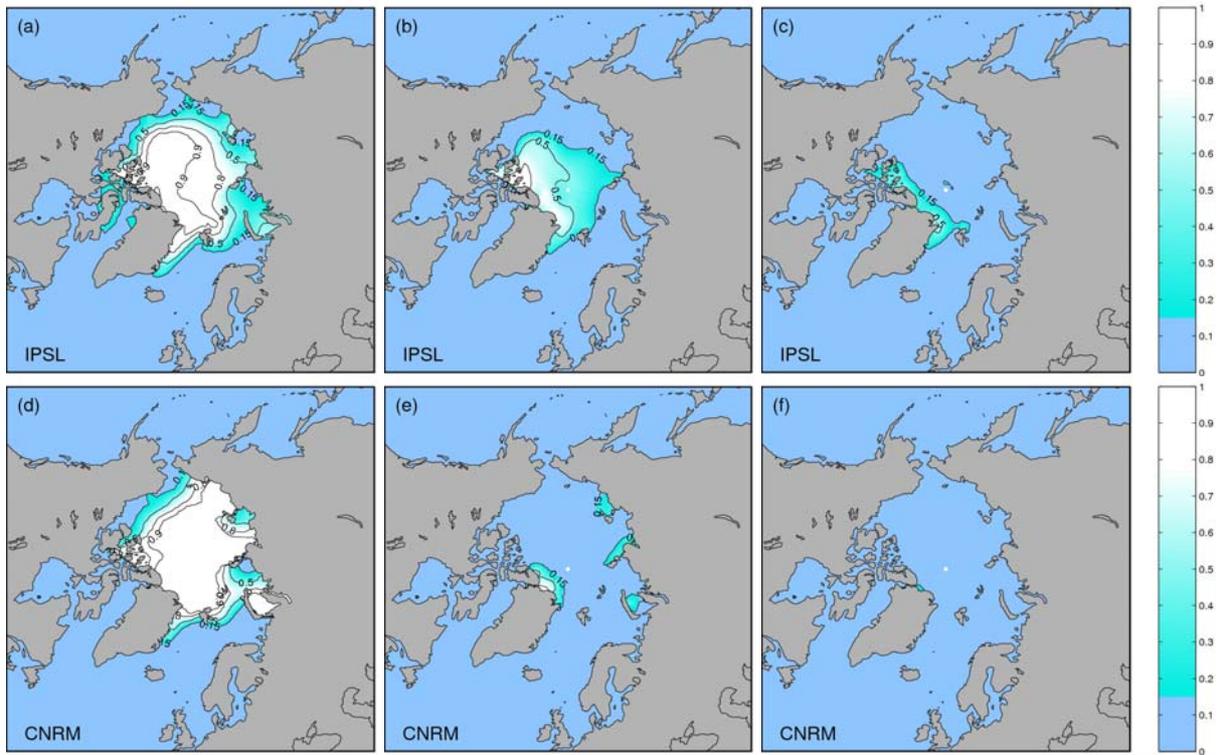


Figure B6: Fraction de glace de mer, en moyenne pour le mois de septembre (extension minimale) en Arctique, simulée par les modèles CNRS/IPSL-CM4 (haut) et Météo-France/ CNRM-CM3 (bas). (a), (d) : période 1960-1989. Ces résultats sont très proches des observations par satellite dont on dispose actuellement; (b), (e) : 2070-2099, scénario SRES-B1; (c), (f) : 2070-2099, scénario SRES-A2. Il apparaît ainsi que, même si les estimations de quantité de glace persistant à la fin de l'été varient selon le modèle et le scénario SRES utilisé, la tendance à la régression de la glace de mer est très nette.

Figure C1

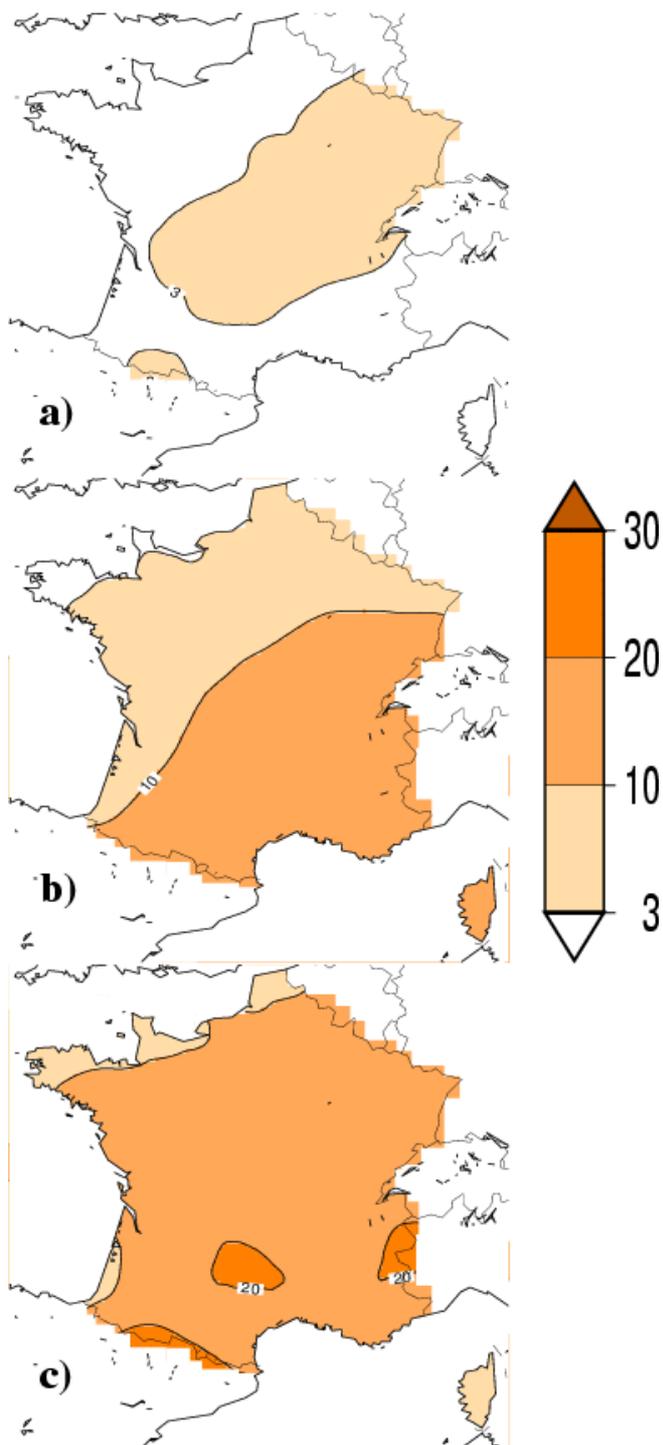


Figure C1 : Nombre moyen de jours de vague de chaleur par été. On définit ici une vague de chaleur par une série d'au moins cinq jours consécutifs où la température maximale diurne dépasse la normale climatique (1961-1990) d'au moins 5°C. Climat de référence (a), climat moyen autour de 2050 vu par le modèle de l'IPSL (b) et par celui de Météo-France (c).

Figure C2

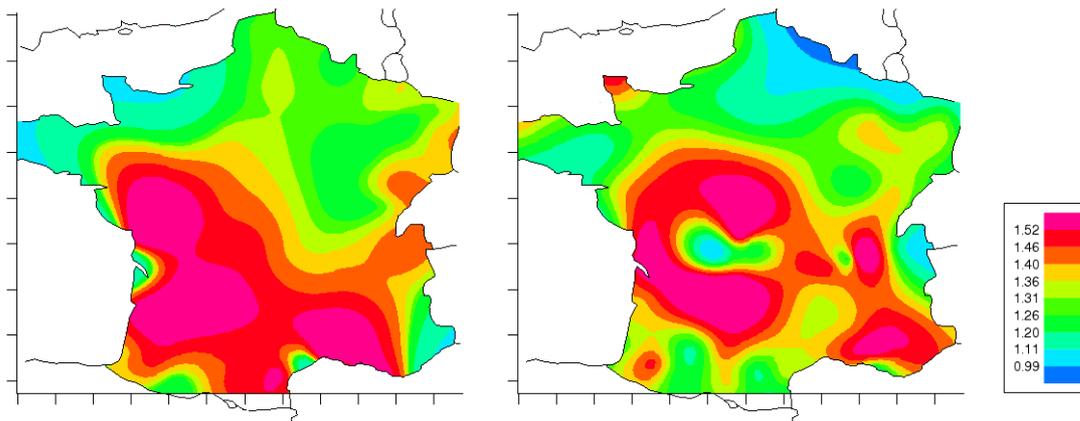


Figure C2: Signal de changement de température minimale journalière d'été calculé à partir de la moyenne de trois scénarios de changement climatique réalisés à partir du modèle ARPEGE-Climat à résolution variable. L'échelle est arbitraire mais le réchauffement augmente du bleu au mauve (gauche). Observation de la tendance de la température minimale journalière d'été sur la période 1971-2000. L'échelle est en dixième de degré par décennie (droite)