

Détection et attribution à l'échelle régionale : le cas de la France

Serge Planton⁽¹⁾ et Laurent Terray⁽²⁾

(1) Météo-France - Centre national de recherches météorologiques (CNRM)
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex 1
serge.planton@meteo.fr

(2) Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs)

Ndlr Cet article est la reprise du chapitre 8 du rapport *Escrime*, publication collective de la communauté des chercheurs français dans le domaine du changement climatique (voir la présentation dans *La Météorologie*, n° 56, page 27).

Les études de détection et d'attribution à l'échelle climatique présentées ici ne s'appuient pas directement sur les simulations réalisées dans le cadre de la préparation du rapport AR4. Il s'agit en effet d'études qui portent sur les séries climatiques d'observations en France, et leur confrontation aux résultats de simulations numériques conduit à l'utilisation de modèles climatiques régionaux. En attendant la mise à disposition de nouvelles simulations climatiques régionales (en cours actuellement au CNRM, au Cerfacs et à l'IPSL) contraintes par les simulations couplées globales réalisées pour l'AR4, ce sont des scénarios

climatiques régionaux produits dans le cadre de projet antérieurs qui ont été analysés (GICC-Imfrex, Prudence, ACI-Discendo...).

La **détection** d'un changement climatique peut se définir comme le processus de démonstration que le climat a changé dans un certain sens statistique, sans donner la raison de ce changement. L'**attribution** des causes du changement climatique consiste, quant à elle, à établir les causes les plus probables de ce changement climatique avec un certain niveau de confiance défini au sens statistique. L'attribution implique, en pratique, de démontrer que le changement détecté est cohérent avec une réponse estimée du climat à une combinaison donnée de forçages naturels et anthropogéniques, et non cohérent avec des explications alternatives, physiquement plausibles, qui excluent une part importante de cette combinaison de forçages (Idag 2005, IPCC 2007).

L'approche devenue classique pour la détection et l'attribution de changements climatiques est la méthode des « **empreintes digitales optimales** », proposée par Hasselmann (1997), puis appliquée en premier lieu aux observations de températures à l'échelle planétaire (Hegerl et al., 1997 ; Allen et Tett, 1999 ; Tett et al., 2002). Plus récemment, une nouvelle classe de méthodes fondées sur une inférence bayésienne a été mise en œuvre (Hasselmann, 1998 ; Schnur et Hasselmann, 2005), mais c'est à l'approche plus classique que se réfèrent les travaux réalisés dans la communauté nationale.

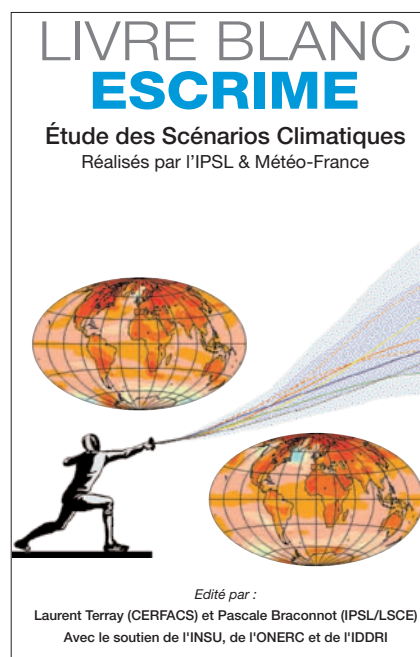
Résumé

Un changement climatique est-il d'ores et déjà en cours et détectable sur un pays comme la France ? Des méthodes, mises au point récemment permettent de donner quelques éléments de réponse.

Abstract

Detection and attribution at regional scale: the case of France.

Is a climatic change already running and detectable on a country like France? New methods, recently developed, allow to give some elements of answer.



À l'échelle internationale, les études utilisant la méthodologie des empreintes digitales, d'abord appliquées à la température près de la surface, ont été étendues à l'échelle globale aux températures troposphériques issues de l'observation satellitaire (Thorne et al., 2003), au contenu thermique de l'océan (Barnett et al., 2001, 2005), aux pressions de surface (Gillet et al., 2005) et très récemment aux précipitations, avec des résultats moins robustes que ceux des températures (Lambert et al., 2004). Des travaux ont également débuté sur la détection des événements extrêmes (Hegerl et al., 2004 ; Stott et al., 2004).

Par ailleurs, seules quelques études se sont intéressées à la détection de changements climatiques sur les températures à des échelles sous-régionales (typiquement celle d'un pays comme la France). Parmi ces études, seules celles qui ont été conduites dans notre communauté ont mis en œuvre la méthodologie des empreintes digitales. Une autre originalité des études menées dans notre communauté a été de considérer aussi le cas des précipitations et des fréquences d'occurrence des régimes de temps à l'échelle régionale.

Études de détection

Les études de détection conduites à l'échelle de la France ont bénéficié de séries de données de températures et de précipitations moyennes mensuelles couvrant l'ensemble du xx^e siècle, homogénéisées suivant une méthodologie proposée par Mestre (2000). Les simulations climatiques régionales utilisées à cette date sont issues du modèle climatique régional Arpège-Climat à

Glossaire

AR4 : Fourth Assessment Report, quatrième rapport du Giec sur le changement climatique.

Bayésienne (inférence) : les méthodes statistiques bayésiennes calculent des degrés de confiance en certaines hypothèses d'après des calculs de probabilités conditionnelles.

CNRM : Centre national de recherches météorologiques.

Discendo : Projet sur la détection du changement climatique aux échelles globale et régionale, dans la cadre de l'Action concertée incitative (ACI) Climat.

GICC-Imfrex : Gestion et impacts du changement climatique (programme du ministère de l'Écologie et du Développement durable) – Impact des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations.

Giec : Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat – sigle anglais IPCC.

Idag : International Ad Hoc Detection and Attribution Group, contribuant au Giec.

IPSL : Institut Pierre-Simon-Laplace.

Prudence : Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining european climate change risks and effects.

résolution variable (60 km sur l'Europe). L'estimation de la variabilité interne, nécessaire au test statistique de rejet de l'hypothèse nulle de la détection, a été obtenue à partir des séries de données elles-mêmes, mais limitées à la période 1900-1970 supposée moins contaminée par le signal de changement climatique. À noter que cette contamination conduit à réduire la probabilité de détection (test plus conservatif).

La première étude de détection entreprise à l'échelle de la France a été celle de Spagnoli et al. (2002). Elle s'est appliquée à l'analyse des tendances sur trente ans des températures minimales et maximales journalières moyennées sur les saisons d'été et d'hiver. Elle a mis en évidence une détection sur les seules tendances de températures minimales journalières d'été, mais pas sur les températures maximales d'été ni sur aucune des températures hivernales.

Une analyse ultérieure a permis de proposer une interprétation physique de cette détection. L'hypothèse a été émise que la variation spatiale du contenu en eau des sols pouvait, via les changements d'évapotranspiration, amplifier le réchauffement dans les régions plus sèches et le limiter dans les régions plus humides. Ce mécanisme est présent dans la simulation du modèle climatique régional (Planton et al., 2005). Une corrélation positive entre l'indice d'humidité des sols simulé sur le climat actuel et reconstitué à partir d'observations sur la période 1971-2000 va dans le sens de cette interprétation physique de la détection. Plus récemment, la comparaison d'indices d'humidité calculés par le modèle climatique régional sur le climat actuel et sur une période de 23 ans, à partir du modèle hydrologique Safran-Isba-Modcou sur la période 1983-2005 (corrélation des moyennes spatiales de l'ordre de 40 %), va aussi dans le sens de cette hypothèse.

Le même type d'étude de détection que celle effectuée sur la température a aussi été réalisé à partir des données homogénéisées de précipitations hivernales en France. L'analyse a également porté sur les tendances sur trente ans de ce paramètre. Comme pour la température, les données sont d'abord centrées dans l'espace afin de n'étudier que la tendance sur la distribution géographique des précipitations. Mais si, dans le cas de la température, cette opération avait pour effet de limiter la possibilité d'une détection en raison du fort signal de réchauffement moyen, elle augmente au contraire les chances d'une détection sur les précipitations car l'évolution de la moyenne des pluies simulées, servant à estimer la tendance liée au réchauffement climatique, est faible en comparaison avec la variabilité des tendances observées. L'analyse montre la détection d'un signal de changement de la distribution spatiale des pluies, avec un niveau de confiance supérieur à 90 % à partir de l'année 1990.



La pluie : une donnée abordée dans le cadre des études sur la détection du changement climatique. (Photo Météo-France)

Une tentative d'interprétation de cette détection par un changement de la fréquence d'occurrence des régimes climatiques dans l'Atlantique Nord se révèle infructueuse. La figure 1 illustre ce résultat en montrant l'évolution de la variable de détection associée aux pluies hivernales, celle de la contribution à cette variable des précipitations explicables par la variabilité de la fréquence des régimes climatiques (obtenue par une régression linéaire des précipitations sur les données de fréquences de régimes climatiques produites dans le cadre du projet Emulate) et le terme résiduel obtenu par différence. L'essentiel de l'évolution de la variable de détection s'explique par celle du terme résiduel, en particulier en fin de période.

Cela implique la présence dans les observations récentes d'un signal significatif sur la tendance à trente ans des précipitations, conforme à celui qui est calculé par le modèle dans les conditions d'un changement climatique anthropique, et ne s'expliquant pas simplement par la variabilité des occurrences des différents régimes climatiques (notamment de l'ONA).

Études d'attribution

Les températures

Les premières études d'attribution ont été réalisées dans le cadre du projet ACI-Discendo sur la détection et attribution du changement climatique à l'échelle régionale. L'approche suivie dans ce projet repose sur l'utilisation de modèles atmosphériques à résolution variable, avec une résolution haute sur la zone d'intérêt, et la considération des conditions aux limites océaniques (températures de surface de la mer – TSM) comme un forçage additionnel s'ajoutant aux forçages anthropiques (gaz à effet de serre – GES – et aérosols sulfatés – SUL) et naturels (solaire – SOL – et volcanisme – VOL). La première idée est de détecter des changements climatiques par rapport à la variabilité interne atmosphérique et à la variabilité liée aux fluctuations océaniques, qu'elles soient de nature interne ou qu'elles soient liées à des facteurs anthropiques et/ou naturels. Autrement dit, cette méthode vise à détecter une réponse directe des forçages considérés (GES, SUL, SOL, VOL) sur l'atmosphère, en plus de celle associée éventuellement au réchauffement océanique dû aux mêmes forçages (Sexton et al., 2001). Cette approche est avantageuse si le rapport signal sur bruit

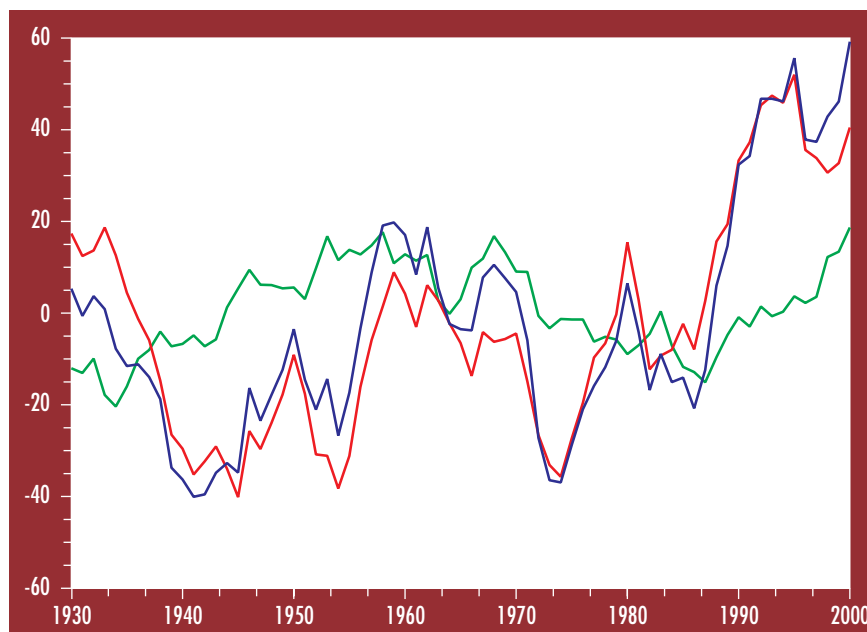


Figure 1 - Évolution de la variable de détection des pluies hivernales en France (en bleu), de la contribution à la variable de détection liée à la variabilité de la fréquence des régimes climatiques de l'Atlantique Nord (en vert) et du terme résiduel (en rouge).

est supérieur à celui de l'approche classique à partir de modèles couplés océan-atmosphère. Assigner aux TSM le rôle d'un forçage additionnel réduit la variabilité interne du système considéré à la variabilité interne atmosphérique, mais ôte également la contribution océanique (liée aux TSM) à l'estimation du signal d'origine anthropique. L'autre avantage est de ne pas reposer complètement sur l'utilisation de modèles couplés et d'éviter les questions complexes sur les problèmes de dérive et de correction de biais et sur leurs liens avec la réponse aux forçages anthropiques.

La deuxième idée concerne la méthodologie d'attribution : elle se base sur la réalisation de simulations d'ensemble qui diffèrent par la combinaison des forçages appliqués. Le premier ensemble est forcé uniquement par les TSM observées sur la période 1950-1999 ; les autres forçages (GES, SUL, NAT – SOL + VOL) sont constants et fixés à leur valeur de 1950. Pour les autres ensembles, on ajoute séquentiellement les évolutions observées des forçages anthropiques et naturels. Les moyennes d'ensemble des simulations réalisées constituent les signaux climatiques et la variabilité interne – bruit – est construite à partir de la variabilité intra-ensemble (écarts entre chaque simulation et la moyenne d'ensemble correspondante). Ces deux ingrédients sont alors utilisés dans la méthode des empreintes digitales qui peut être également vue comme une simple méthode de régression à plusieurs paramètres. Les observations (y) peuvent être repré-

sentées par une combinaison linéaire des forçages considérés x_1 (TSM), x_2 ($G=[TSM,GES]$), x_3 ($GS=[TSM,GES,SUL]$) et x_4 ($GS-NAT=[TSM,GES,SUL,NAT]$), plus un résidu représentant la variabilité interne, u :

$$y = \sum \beta_i x_i + u$$

Les symboles β_i sont les coefficients d'ajustement (ou amplitudes des signaux) estimés par la régression.

La détection des signaux considérés repose alors sur le test de l'hypothèse nulle suivante, $H_0 : \beta = 0$. L'impossibilité de rejeter H_0 signifie que les amplitudes des signaux (associés aux forçages considérés) dans les observations n'est pas différente de 0 au niveau de confiance statistique choisi (95 %). La partie attribution de l'analyse cherche si les amplitudes sont cohérentes avec le vecteur identité ($H_0 : \beta = 1$). Si H_0 ne peut être rejetée, il est alors possible d'attribuer le changement observé à l'effet combiné des différents forçages considérés. Par ailleurs, la plausibilité de cette reconstruction est vérifiée par un test de cohérence statistique : on s'assure que le résidu u est cohérent avec la variabilité interne représentée ici par la variabilité intra-ensemble. La contribution individuelle de chaque forçage se calcule à l'aide d'une hypothèse de linéarité sur les combinaisons des différents forçages (Gillett et al., 2004). Il est à noter que y , x_i et u , à la différence des travaux cités au paragraphe précédent, sont ici des vecteurs spatio-temporels (on essaie de détecter une

empreinte digitale qui varie dans le temps et non pas une simple tendance linéaire). Remarquons aussi que l'amplitude des signaux considérés est plus faible que dans l'approche précédente (où le signal est obtenu par différence entre le climat futur – 2070-2099 – et le climat présent). Cependant c'est bien le rapport final sur bruit qui est la quantité essentielle pour l'exercice de détection et son estimation dépend de manière cruciale de la réduction du bruit dans l'approche forcée.

La méthodologie a été appliquée aux anomalies décennales des températures minimales et maximales d'été sur la période 1950-1999 (Terray et Planton, 2006). Le réchauffement observé des minimales peut s'expliquer par la combinaison du signal océanique avec les effets directs dus aux GES et SUL. L'analyse d'attribution permet par exemple de montrer que cette combinaison explique les deux tiers du réchauffement moyen observé sur la France lors de la décennie 1990-1999 (figure 2). Il faut aussi noter ici que le forçage SUL est indispensable pour arriver à détecter une combinaison de signaux. Le signal océanique semble fortement lié au réchauffement global de l'océan (particulièrement depuis 1980) auquel s'ajoute la contribution d'un mode de variabilité appelé Oscillation multidécennale atlantique (OMA) dont l'origine est probablement interne à l'océan. Le basculement vers une phase positive de cette oscillation dans les dernières décennies du xx^e siècle a contribué à très légèrement augmenter le réchauffement principal dû aux effets anthropiques (GES + SUL). La détection sur les maximales est moins robuste, mais les effets combinés des TSM et GES sont détectés même si le modèle semble légèrement sous-estimer la réponse à ces forçages par rapport aux observations.

Les précipitations et la pression de surface

Une approche différente a été suivie pour les précipitations. Les résultats des études de détection et attribution sur les précipitations hivernales (hiver étendu, novembre à mars) utilisant la même méthodologie que celle utilisée pour les températures (voir section précédente) ne permettent pas de conclure clairement sur la détection et encore moins sur l'attribution des changements observés sur les anomalies décennales de la période 1950-1999, à la différence des résultats men-

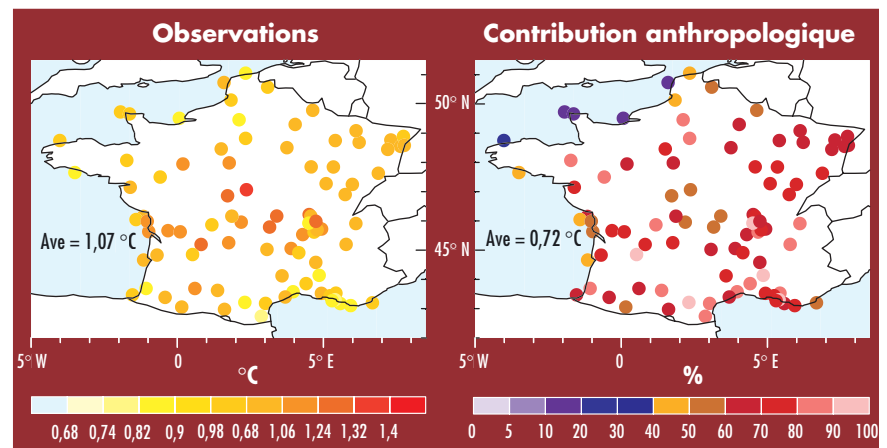


Figure 2 - Anomalies de la température minimale d'été pour la décennie 1990-1999 par rapport à la climatologie 1961-1990. À droite : valeurs provenant des réseaux d'observation de Météo-France, en degrés Celsius ; à gauche : fraction de l'anomalie attribuable aux effets océaniques et anthropiques directs en pour-cent. L'analyse du signal océanique montre qu'il est majoritairement lié au réchauffement planétaire avec une faible contribution de la variabilité Atlantique multidécennale d'origine interne.

tionnés dans la partie précédente. À partir de ce constat, l'idée a été de séparer le signal des précipitations en une partie dynamique (liée à l'évolution des fréquences d'occurrence des régimes de temps) et un résidu thermodynamique qui peut être lié en partie au changement sur le contenu en vapeur d'eau et à d'autres causes. Pour effectuer cette séparation, les techniques de désagrégation basées sur les régimes de circulation atmosphérique à l'échelle journalière (les régimes de temps) et développées pour les études d'impact, en particulier hydrologiques ont été utilisées pour construire une fonction de transfert entre les fréquences d'occurrence de régimes de temps et les précipitations sur la France (Boé et Terray, 2007). Le jeu de données utilisé pour les régimes de temps est le jeu de pres-

sion de surface à la fréquence journalière sur l'Atlantique Nord et l'Europe développé au sein du projet européen Emulate.

Les régimes considérés ici diffèrent de ceux utilisés pour les températures, d'une part, par l'aspect temporel (journalier et non pas mensuel) et, d'autre part, par la méthode de construction. L'approche suivie ici consiste à déterminer des régimes discriminants, non seulement pour la grande échelle, mais aussi pour la variable du climat sensible à laquelle on s'intéresse. Pour ce faire, on applique les outils mathématiques de classification aux deux variables (pression de surface et précipitations) simultanément. L'analyse montre qu'il est alors possible de reconstruire par régression multiple et avec une grande

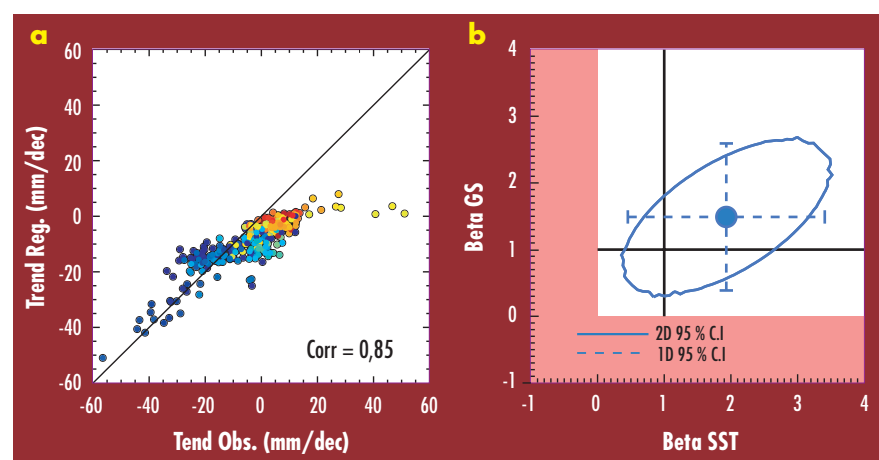


Figure 3 - a) Tendances linéaires des précipitations (en mm/décennie) pour les 299 stations françaises sur la période 1951-2000 : observées sur l'axe des x et reconstruites par régression sur les occurrences des régimes sur l'axe des y. L'échelle de couleur représente la latitude de la station, du nord (rouge) au sud (bleu). b) Ellipse représentant l'estimation de la distribution jointe des amplitudes pour la combinaison des deux signaux (SST et GHG-SUL) au niveau de confiance 95 %. La variable considérée est la fréquence d'occurrence des régimes. L'ellipse est centrée sur l'estimation optimale des amplitudes marquées par un cercle coloré en bleu. Sa taille reflète l'incertitude associée aux amplitudes des deux signaux identifiés dans les labels de couleur. Les barres horizontales et verticales indiquent les distributions unidimensionnelles des amplitudes pour chacun des signaux au niveau de confiance 95 %.

précision (corrélation de 0,85) les tendances des précipitations observées sur la France à partir des seules fluctuations des fréquences d'occurrence des huit régimes de temps trouvés (figure 3a). Les stations où la tendance est sous-estimée par la reconstruction se situent toutes dans le nord-est de la France. Ces écarts aux données observées pour le Nord-Est peuvent être diminués en prenant en compte dans la méthode de régression les changements intra-régime (Boé et Terray, 2007). L'étape finale consiste alors à appliquer la méthodologie décrite au paragraphe précédent pour détecter, et éventuellement attribuer, les changements des fréquences d'occurrence dus aux forçages océanique (TSM) et anthropiques (GES et SUL). Le vecteur de détection est ici constitué des moyennes décennales des fréquences d'occurrence des huit types de temps. Les résultats (figure 3b) montrent qu'il est possible de détecter l'effet du forçage combiné GES-SUL et des TSM sur les changements d'occurrence des régimes de temps et des précipitations associées.

Conclusion

Les études menées au sein de notre communauté 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. Les travaux d'attribution montrent que la majeure partie de ce réchauffement est due à l'action combinée des GES et SUL, à laquelle s'ajoute une petite contribution liée au mode OMA. Ce résultat est important car il bouscule les certitudes affichées, depuis le troisième rapport du Giec, sur l'échelle spatiale minimale pour la détection du signal anthropique (5 000 km). Les analyses réalisées semblent indiquer que les non-linéarités entre la climatologie du contenu en eau des sols et les anomalies de température, via les changements d'évapotranspiration, sont responsables de la structure spatiale du réchauffement. L'examen de la climatologie de l'eau du sol simulée et sa comparaison avec les analyses produites par la chaîne hydro-

logique SIM de Météo-France suggèrent que le mécanisme à l'œuvre dans le modèle puisse aussi jouer un rôle important dans les observations. D'autre part, les études sur les précipitations montrent qu'il est également possible de détecter un signal anthropique sur les tendances hivernales des trente dernières années. La séparation du signal sur les précipitations en une partie dynamique (liée aux fluctuations d'occurrence de régimes de temps discriminants pour les précipitations) et un résidu montrent que cette composante dynamique capture presque complètement la tendance observée. Les empreintes des signaux TSM et de la combinaison GES-SUL sont détectées dans les observations de l'occurrence des régimes.

L'ensemble de ces résultats constitue par ailleurs une validation fine de la capacité du modèle régional à reproduire divers aspects de la sensibilité du climat européen aux forçages anthropiques et peuvent servir à mieux contraindre les projections régionales pour le climat du XXI^e siècle.

Bibliographie

- Allen M. R. et S. F. B. Tett, 1999 : Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Climate Dynamics*, 15, 419-434.
- Barnett T. P., D. W. Pierce et R. Schnur, 2001 : Detection of anthropogenic climate change in the world's oceans. *Science*, 292, 270-274.
- Barnett T. P., D. W. Pierce, R. Achuta, M. Krishna, P. J. Glecker, B. D. Santer, J. M. Gregory et W. M. Washington, 2005 : Penetration of human warming into the World's oceans. *Science*, 309, 284-287.
- Boé J. et L. Terray, 2007 : Regional-scale detection of dynamical changes in precipitation. *J. Climate*, accepté.
- Gillett N. P., R. J. Allan et T. J. Ansell, 2005 : Detection of external influence on sea level pressure with a multi-model ensemble. *Geophysical Research Letters*, 32(19), L19714.
- Gillett N. P., M. F. Wehner, S. F. B. Tett et A. J. Weaver, 2004 : Testing the linearity of the response to combined greenhouse gas and sulfate aerosol forcing. *Geophysical Research Letters*, 31, L14201, doi:10.1029/2004GL020111.
- Hasselmann K., 1997 : Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics*, 13, 601-611.
- Hasselmann K., 1998 : Conventional and Bayesian approach to climate-change detection and attribution. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 2541-2565.
- Hegerl G. C., K. Hasselmann, U. Cubash, J. F. B. Mitchell, E. Roeckner, R. Voss et J. Waszkewitz, 1997 : Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Climate Dynamics*, 13, 613-634.
- Hegerl G. C., F. W. Zwiers, V. V. Kharin et P. A. Stott, 2004 : Detectability of anthropogenic changes in temperature and precipitation extremes. *Journal of Climate*, 17, 3683-3700.
- Idag, 2005 : Detecting and Attributing External Influences on the Climate System: A Review of Recent Advances. *Journal of Climate*, 18, 1291-1314.
- IPCC, 2007: Fourth assessment report Climate change 2007. www.ipcc.ch.
- Lambert F. H., P. A. Stott, M. R. Allen et M. A. Palmer, 2004 : Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 31(10), L10203.
- Planton S., M. Déqué, H. Douville et B. Spagnoli, 2005 : Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *C.R. Géoscience*, 337, 193-202.
- Sexton D. M. H., D. P. Rowell, C. K. Folland et D. J. Karoly, 2001 : Detection of anthropogenic climate change using an atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, 17, 669-685.
- Schnur R. et K. Hasselmann, 2005 : Optimal filtering for Bayesian detection of climate change. *Climate Dynamics*, 24, 45-55.
- Spagnoli B., S. Planton, M. Déqué, O. Mestre et J.-M. Moisselin, 2002 : Detecting climate change at the regional scale : the case of France. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10, 90-1, 90-4.
- Stott P. A., D. A. Stone et M. R. Allen, 2004 : Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610-614.
- Terray L. et S. Planton, 2006 : Detection and attribution of human influence on climate at sub-regional scale. *Nature*, soumis.
- Thorne P. W., P. D. Jones, S. F. Tett, M. R. Allen, D. E. Parker, P. A. Stott, G. S. Jones, T. J. Osborne et T. D. Davies, 2003 : Probable causes of late twentieth century tropospheric temperature trends. *Climate Dynamics*, 21, 573-591.
- Tett S. F. B., G. S. Jones, P. A. Stott, D. C. Hill, J. F. B. Mitchell, M. R. Allen, W. J. Ingram, T. C. Johns, C. E. Johnson, A. Jones, D. L. Roberts, D. M. H. Sexton et M. J. Woodage, 2002 : Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 107, 4306, doi:10.1029/2000JD000028.