

# 8

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

Serge Planton (1), Laurent Terray (2)

(1) CNRM/GMGEC, Météo-France

42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01

Email : [serge.planton@meteo.fr](mailto:serge.planton@meteo.fr)

(2) Sciences de l'Univers au CERFACS, CERFACS/CNRS URA 1875

42 Avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01

Email : [laurent.terray@cerfacs.fr](mailto:laurent.terray@cerfacs.fr)

### Introduction

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, CERFACS et 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-IMFRET, 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 optimale 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.

A 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-régionale (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.

## Etudes 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 20<sup>ème</sup> siècle, homogénéisées suivant une méthodologie proposée par Mestre (2000). Les simulations climatiques régionales utilisées à cette date sont issues du modèle climatique régional ARPEGE-Climat à 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. A 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 30 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 température 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 simulés 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'humidités 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 (SIM) 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 réalisée 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 30 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.

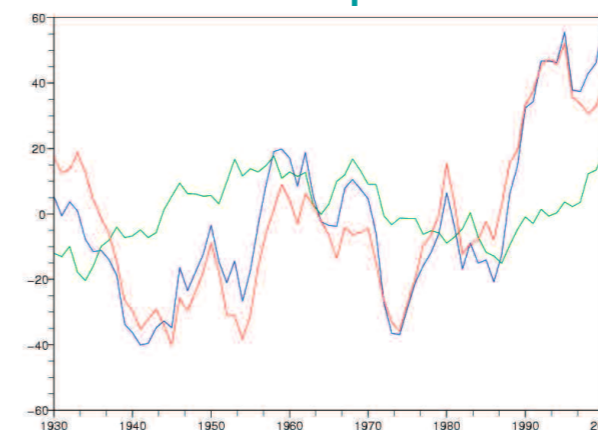


Figure 1 : Evolution de la variable de détection des pluies hivernales en France (en bleu), de la contribution à la variable de détection liée à la variabilité de la fréquence des régimes climatiques de l'Atlantique Nord (en vert) et du terme résiduel (en rouge).

Une tentative d'interprétation de cette détection par un changement de la fréquence d'occurrence des régimes climatiques dans l'Atlantique Nord s'avère 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 30 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).

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 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 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 biais et 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 et 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 représentées par une combinaison linéaire des forçages considérés  $X_1$  (TSM),  $X_2$  (G=[TSM,GES]),  $X_3$  (GS=[TSM,GES,SUL]) and  $X_4$  (GS-NAT=[TSM,GES,SUL,NAT]) plus un résidu représentant la variabilité interne,  $u$  :

$$y = \sum \beta_j x_j + u$$

Avec  $\beta_j$  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  $y$ ,  $x_j$  et  $u$ , à la différence des travaux cités au paragraphe précédent, sont ici des vecteurs spatio-temporels (on essaye 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).

La méthodologie a été appliquée aux anomalies décennales des températures minimales et maximales d'été sur la période 1950-1999 (Terry 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

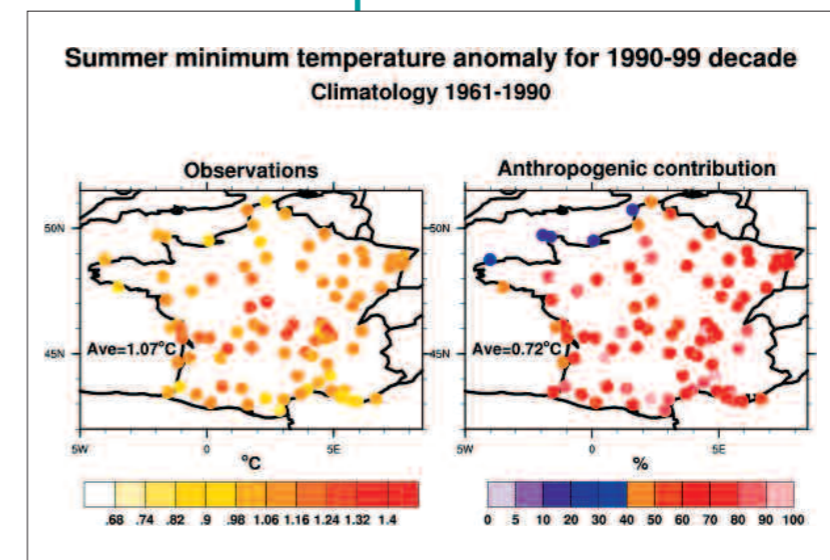


Figure 2: Anomalies de la température minimale d'été pour la décennie 1990-1999 par rapport à la climatologie 1961-1990. A droite : valeurs provenant des réseaux d'observations de Météo-France en degrés Celsius ; à gauche : fraction de l'anomalie attribuable aux effets océaniques et anthropiques directs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

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 l'Oscillation multi-décennale 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 20<sup>ème</sup> 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.

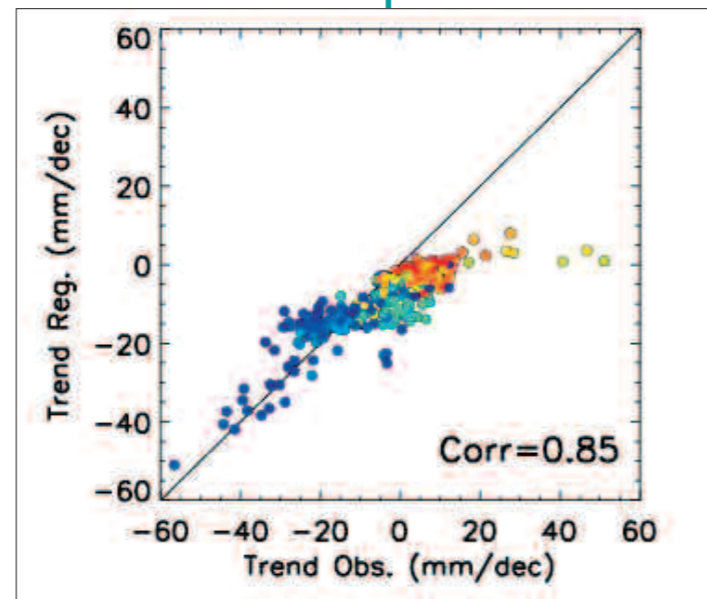
## Les précipitations et la pression de surface

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 mentionnés dans la partie précédente.

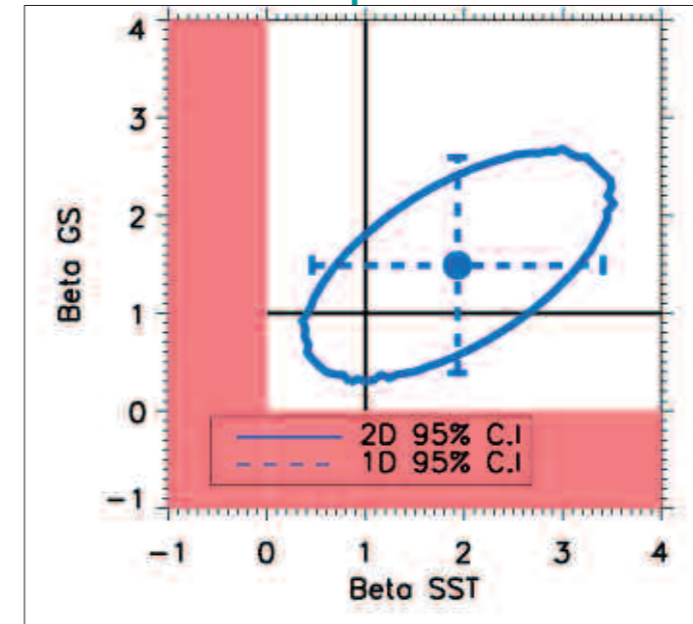
**À partir de ce constat, l'idée a été de séparer le signal des précipitations en une partie dynamique (liée à l'évolution des fréquences d'occurrence des régimes de temps) et un résidu thermodynamique qui peut être lié en partie au changement sur le contenu en vapeur d'eau et à d'autres causes.**

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 (**voir Chapitre régionalisation et extrêmes**) 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 2006). Le jeu de données utilisé pour les régimes de temps est le jeu de pression 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 dans la section précédente, 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 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 2006). L'étape finale consiste alors à appliquer la méthodologie décrite au paragraphe



**Figure 3 : a.** Tendances linéaires des précipitations (en mm/décennie) pour les 299 stations France 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)



**Figure 3 : b.** Ellipse représentant l'estimation de la distribution jointe des amplitudes pour la combinaison des deux signaux (TSM 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 colorié en bleu et sa taille reflète l'incertitude associée aux amplitudes des deux signaux identifiés sur les deux axes. Les barres horizontales et verticales indiquent les distributions unidimensionnelles des amplitudes pour chacun des signaux au niveau de confiance 95%.

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 8 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 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 dû 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 (5000 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 Météo-France produites par la chaîne SIM 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 30 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 constituent 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 21<sup>ème</sup> siècle.**

## Références

- Allen, M.R., and S.F.B. Tett, 1999 :**  
Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Clim. Dyn.*, 15, 419-434.
- Barnett, T.P., D.W. Pierce, and R. Schnur, 2001 :**  
Detection of anthropogenic climate change in the world's oceans. *Science*, 292, 270-274.
- Barnett, T.P., et al., 2005 :**  
Penetration of a warming signal in the World's oceans: human impacts. *Science*, 309, 284-287.
- Boé, J., et L. Terray, 2006 :**  
Regional-scale detection of dynamical changes in precipitation. *J. Clim.*, submitted
- Gillett, N.P., R.J. Allan, and T.J. Ansell, 2005 :**  
Detection of external influence on sea level pressure with a multi-model ensemble. *Geophys. Res. Lett.*, 32(19), L19714.
- Gillett, N.P., M.F. Wehner, S.F.B. Tett, and A.J. Weaver, 2004 :**  
Testing the linearity of the response to combined greenhouse gas and sulfate aerosol forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14201, doi:10.1029/2004GL020111.
- Hasselmann, K., 1997 :**  
Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change, *Clim. Dyn.*, 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, and J. Waskewitz, 1997 :**  
Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change, *Clim. Dyn.*, 13, 613-634.
- Hegerl, G.C., F.W. Zwiers, V.V. Kharin, and P.A. Stott, 2004 :**  
Detectability of anthropogenic changes in temperature and precipitation extremes. *J. Clim.*, 17, 3683-3700.
- IDAG, 2005 :**  
Detecting and Attributing External Influences on the Climate System : A Review of Recent Advances. *J. Clim.*, 18, 1291-1314.
- Lambert, F.H., P.A. Stott, M.R. Allen, and M.A. Palmer, 2004 :**  
Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 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, and D.J. Karoly, 2001 :**  
Detection of anthropogenic climate change using an atmospheric GCM. *Clim. Dyn.*, 17, 669-685.
- Schnur, R., and K. Hasselmann, 2005 :**  
Optimal filtering for Bayesian detection of climate change. *Clim. Dyn.*, 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, and M.R. Allen, 2004 :**  
Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610-614.
- Terray, L., and S. Planton, 2006 :**  
Detection and attribution of human influence on climate at sub-regional scale. *Nature*, to be submitted
- Thorne, P.W., et al., 2003 :**  
Probable causes of late twentieth century tropospheric temperature trends. *Clim. Dyn.*, 21, 573-591.
- Tett, S.F.B., et al., 2002 :**  
Estimation of natural and anthropogenic contributions to twentieth century temperature change. *J. Geophys. Res.*, 107, 4306, doi:10.1029/2000JD000028.

## Acronymes

- ACI** : Action concertée incitative
- ANR** : Agence nationale pour la recherche
- ARPEGE** : modèle atmosphérique de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France
- AR4** : Fourth assessment report (4<sup>ème</sup> rapport du GIEC)
- CEA** : Commissariat à l'énergie atomique
- CERFACS** : Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique
- CFMIP** : Cloud feedback model intercomparison project (projet d'intercomparaison des retroactions nuageuses dans les modèles)
- CMIP** : Coupled models intercomparison project (projet d'intercomparaison des modèles couplés)
- CNRM** : Centre national de recherches météorologiques
- CNRS** : Centre national de la recherche scientifique
- CRU** : Climate research unit (unité de recherche climatique de l'Université d'East Anglia)
- C4MIP** : Coupled climate-carbon cycle model intercomparison project (projet d'intercomparaison des modèles couplés climat-cycle du carbone)
- DMG** : Dernier maximum glaciaire
- DODS** : Distributed oceanographic data system (système distribué pour la diffusion de données)
- ENOA** : El Niño oscillation australe
- ENSO** : El Niño southern oscillation (ENOA en français)
- ERA40** : Réanalyses atmosphériques du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
- GELATO** : Modèle de banquise du CNRM
- GES** : Gaz à effet de serre
- GICC** : Gestion des impacts du changement climatique
- GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- IDAG** : International detection and attribution group (groupe international sur la détection et l'attribution)
- IDDRI** : Institut du développement durable et des relations internationales
- IDRIS** : Institut du développement et des ressources en calcul scientifique
- INSU** : Institut national des sciences de l'univers
- IPCC** : Intergovernmental panel on climate change (GIEC en français)
- IPSL** : Institut Pierre-Simon Laplace
- IRD** : Institut de recherche sur le développement
- ISBA** : Interaction sol biosphère atmosphère (modèle de végétation)
- LEFE** : Les Enveloppes fluides et l'environnement
- LEGOS** : Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale
- LIM** : modèle de glace de mer de l'UCL
- LGGE** : Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement
- LMD** : Laboratoire de météorologie dynamique
- LMDZ** : modèle atmosphérique développé au LMD
- LOCEAN** : Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques (anciennement LOdYC)
- LODYC** : Laboratoire d'océanographie dynamique et du climat
- LSCE** : Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
- MAO** : Mousson de l'Afrique de l'ouest
- MCG** : Modèle de circulation générale
- MCGOA** : Modèle de circulation générale couplé océan atmosphère
- MEDD** : Ministère de l'écologie et du développement durable
- MNHN** : Muséum national d'histoire naturelle
- NOAA** : National oceanic and atmospheric administration (administration nationale océanique et atmosphérique, USA)
- NAO** : North Atlantic oscillation (ONA en français)
- OASIS** : logiciel de couplage de modèles atmosphériques et océaniques développé au CERFACS

- OMA** : Oscillation multi-décennale Atlantique
- ONA** : Oscillation Nord Atlantique
- ONERC** : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer
- OPA** : Modèle de circulation générale océanique développé au LODYC
- ORCA** : Version globale du modèle OPA
- PCMDI** : Program for climate model diagnosis and intercomparison (programme sur l'intercomparaison et les diagnostics des modèles climatiques)
- PMIP** : Paleoclimate modeling intercomparison project (projet d'intercomparaison des modèles paléo-climatiques)
- PMRC** : Programme mondial de recherche sur le climat
- ppm** : parties par million
- SRES** : Special report on emission scenarios (scénarios d'émission des gaz à effet de serre, voir GIEC)
- TAR** : Third assessment report (3<sup>ème</sup> rapport du GIEC)
- TSM** : Température de surface de la mer
- SST** : Sea surface temperature (TSM en français)
- UCL** : Université catholique de Louvain la Neuve
- UJF** : Université Joseph Fourier
- UMR** : Unité mixte de recherche
- UPMC** : Université Pierre et Marie Curie
- URA** : Unité de recherche associée
- UVSQ** : Université Versailles Saint Quentin
- WCRP** : World climate research program (PMRC en français)
- 10n considère ici le forçage radiatif au sommet de l'atmosphère avec ajustement stratosphérique. Cette méthode suppose que la stratosphère s'ajuste de sorte que son bilan radiatif reste inchangé. Elle permet de rendre le forçage radiatif mieux adapté à l'étude des variations lentes du climat.

## Remerciements

Les personnes citées ci-dessous ont activement contribué à la mise au point des modèles couplés utilisés pour les scénarios GIEC, à la réalisation des expériences, à la diffusion des résultats, ou aux analyses scientifiques présentées dans ce document :

Olivier Arzel, Jacques Bellier, Rachid Benshila, Sandrine Bony, Julien Boé, Laurent Bopp, Olivier Boucher, Jean-Philippe Boulanger, Pascale Braconnot, Alain Braun, Patrick Brockmann, Patricia Cadule, Christophe Cassou, Arnaud Caubel, Fabrice Chauvin, Francis Codron, Nathalie de Noblet, Sébastien Denvil, Michel Déqué, Sébastien Dominiak, Hervé Douville, Jean-Louis Dufresne, Laurent Fairhead, Thierry Fichefet, Marie-Angèle Filiberti, Marie-Alice Foujols, Claude Frankignoul, Pierre Friedlingstein, Guillaume Gastineau, Christophe Genthon, Josephine Ghattas, Anne-Laure Gibelin, Katarina Goubanova, Jean-Yves Grandpeix, Eric Guilyardi, Didier Hauglustaine, Frédéric Hourdin, Abderaman Idelkadi, Soumaya Jamili, Masa Kageyama, Gherart Krinner, Alexandre Laîné, Alban Lazar, Phu Le Van, Claire Lévy, Laurent Li, François Lott, Gurban Madec, Eric Maisonnave, Pascal Marquet, Olivier Marti, Sébastien Masson, David Salas y Melia, Ionela Musat, Serge Planton, Johannes Quaas, Annie Rascol, Catherine Ritz, Jean-François Royer, Victoria Serafini, Florence Sevault, Samuel Somot, Didier Swingedouw, Claude Talandier, Laurent Terray, Pascal Terray, Hubert Teyssède, Sophie Tyteca, Sophie Valcke, Nicolas Viovy, Aurore Voldoire.

*Le projet ESCRIME tient également à remercier les centres de calcul de l'IDRIS, de Météo-France et du CEA sans lesquels cet effort sans précédent de la communauté française de modélisation climatique n'aurait pu aboutir.*

