

Le lien entre circulation atmosphérique de grande échelle et canicules pour la prévision à longue échéance et l'impact du changement climatique

Link between large scale atmospheric circulation and heat waves for seasonal forecasting and climate change impact studies

JULIEN BOÉ, CHRISTOPHE CASSOU, LAURENT TERRAY

CERFACS

42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1

SYLVIE PAREY, LAURENT DUBUS

EDF/R&D/MFEE

6 quai Watier, 78401 Chatou Cedex

Tél : +33 (0)1 30 87 76 14, Fax : +33 (0)1 30 87 71 08 -, e-mail : sylvie.parey@edf.fr

Les modèles climatiques sont adaptés à la représentation de la circulation atmosphérique de grande échelle et du climat moyen de grandes régions du monde. Le lien entre la circulation atmosphérique de grande échelle, et plus précisément ses structures stables et récurrentes que sont les régimes de temps, et les conditions locales est utilisé dans cette étude, d'une part dans un but de prévision saisonnière et d'autre part pour analyser l'impact du changement climatique. En été, 4 régimes de temps sont identifiés sur la zone Atlantique-Europe, et 2 d'entre eux sont associés à l'occurrence préférentielle de conditions chaudes et sèches sur la France. Ces régimes ont été particulièrement fréquents lors des étés caniculaires et un lien a pu être mis en évidence entre des conditions tropicales anormales et l'occurrence de ces régimes chauds et secs, qui pourrait constituer un espoir de prévisibilité des canicules. Par ailleurs, le changement climatique conduit à une augmentation de la fréquence d'un des régimes chaud et sec et à la diminution d'occurrence du régime le plus froid et humide. Il se traduirait alors globalement par une fréquence plus importante de canicules dans le futur, avec cependant des incertitudes importantes, notamment sur leur intensité.

Climate models are designed to reproduce the average behaviour of the climatic parameters over quite large geographical areas, and the large scale atmospheric circulation. Large scale atmospheric circulation shows some stable and recurrent patterns, called weather regimes, whose succession can explain the local observed meteorological conditions. These structures are then identified for the summer season and their link with hot and dry days in France are studied. From the 4 identified summer regimes, 2 are associated with an increased occurrence of hot and dry conditions over France. Although this link does not explain the total summer variability, it can help to anticipate hot and dry conditions and it is used here for seasonal forecast perspectives and to analyse the impact of climate change on the occurrence of heat waves.

Regarding seasonal forecast, an influence of anomalous tropical conditions (a northern shift of the Inter Tropical Convergence Zone) has been identified as susceptible to increase the occurrence frequency of the 2 regimes linked to hot and dry conditions in France in summer. Thus, if this link can be confirmed and if climate models are able to reproduce it correctly, then it could lead to an interesting anticipation of the possible occurrence of an heat wave in the next summer.

As far as climate change is concerned, the study shows that in the future, one of the 2 hot and dry regimes could be more frequent, while the most cold and wet one becomes less frequent. Thus, globally, hot and dry days should occur more frequently. There are however still many uncertainties, as on the one hand, models show different results concerning the future occurrence of the regimes, and on the other hand, the other local mechanisms linked to the heat wave occurrence, like soil moisture content and evolution, are sometimes poorly represented.

I ■ INTRODUCTION

Les modèles climatiques, mis en œuvre pour réaliser des prévisions saisonnières ou simuler les évolutions possibles du climat en réponse au forçage radiatif induit par les activités humaines, ne sont pas adaptés à la représentation détaillée des phénomènes à l'échelle locale, a fortiori lorsqu'il s'agit d'extrêmes météorologiques. En revanche, ils ont une capacité reconnue à représenter correctement les caractéristiques de grande échelle de la circulation atmosphérique. Une méthode développée et mise en œuvre au CERFACS depuis de nombreuses années consiste donc à relier les événements locaux à la circulation atmosphérique de grande échelle, afin de pouvoir utiliser les résultats de ces modèles dans les études concernant la prévision à longue échéance ou l'impact du changement climatique.

Le système climatique possède en effet un certain nombre d'états préférentiels caractérisés par des structures spatiales cohérentes à grande échelle appelées « régimes de temps ». Ces régimes sont caractérisés par leurs propriétés de récurrence, de persistance ou d'occurrence [5]. Les fluctuations météorologiques peuvent alors s'interpréter comme la transition temporelle entre ces régimes [6]. Ainsi, si une variable locale peut être associée à l'occurrence de ces régimes, alors une modification de la fréquence d'apparition des régimes pourra se traduire par une modification consécutive de la variable locale. Cette idée a été appliquée au phénomène de canicule en France et en Europe, d'une part pour rechercher une éventuelle prévisibilité à moyen terme de ces événements, et d'autre part pour analyser l'impact du changement climatique sur l'occurrence des canicules en France.

II ■ LE LIEN ENTRE REGIMES DE TEMPS ET CANICULES

● II.1 LES REGIMES DE TEMPS EN ETE ET LEUR LIEN AVEC LA TEMPERATURE

Les régimes de temps sont des structures spatiales de grande échelle récurrentes et persistant plusieurs jours. Ils sont généralement déterminés à partir de classifications automatiques de cartes de pression ou de géopotential sur la région Atlantique-Europe. Dans cette étude [2], la classification est effectuée à l'aide de l'algorithme du k-means [5] à partir des données de pression au niveau de la mer ou de géopotential à 500 hPa des réanalyses du National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) sur la période 1948-2006. Les cartes journalières d'été (92 jours par an du 1^{er} juin au 31 août) sont utilisées pour l'analyse, sur une fenêtre géographique limitée à la zone Nord Atlantique Europe (entre 20° et 80° de latitude nord et entre 90° ouest et 30° est de longitude). La classification obtenue à partir des anomalies de pression au niveau de la mer ou de géopotential à 500 hPa conduit à des résultats similaires. Elle permet de dégager quatre régimes de temps d'été, dont la fréquence d'occurrence est sensiblement la même. Deux de ces régimes de temps, représentés sur la *figure 1* (a et c), correspondent respectivement

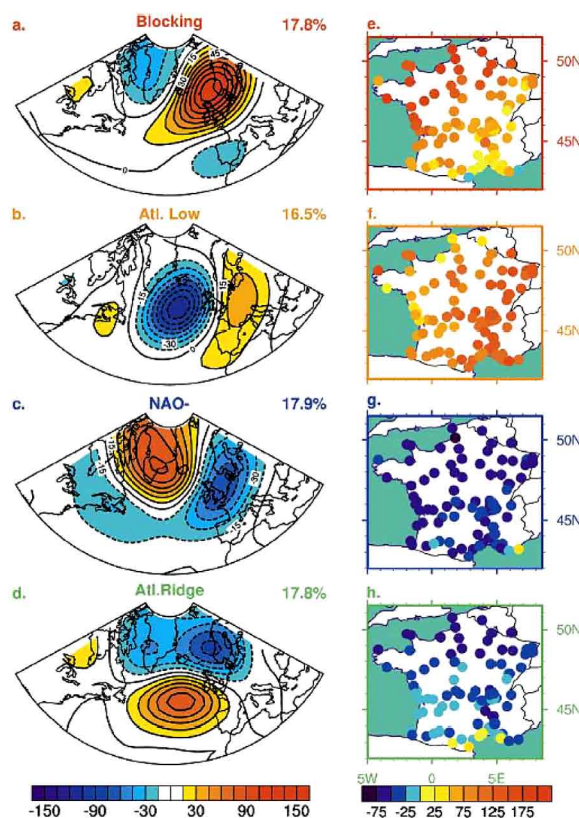


Figure 1 : A gauche : régimes de temps en été calculés à partir de la hauteur géopotentielle à 500 hPa sur le secteur Europe Atlantique-Nord. L'intervalle entre les isocontours est de 15m ; à droite : changement de fréquence (%) de jours très chauds pour chaque régime.

aux phases positive et négative de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO pour North Atlantic Oscillation en anglais) en été ; cependant, la phase positive se comporte comme une structure de blocage anticyclonique, et sera donc désignée comme un régime de « blocage ». Les deux autres régimes correspondent respectivement à une anomalie cyclonique positionnée sur l'océan Atlantique Nord, avec des anomalies légèrement positives sur le nord du continent européen (b) et à une anomalie anticyclonique située au large de l'Europe de l'ouest, surmontée d'une zone d'anomalies négatives (d). Le premier sera donc dénommé « dépression Atlantique » et le second « dorsale Atlantique ».

La relation entre l'occurrence de ces régimes et la possibilité de températures élevées en France est analysée en sélectionnant dans les séries quotidiennes de température observées (fournies par Météo-France ou par le projet European Climate Assessment and Dataset [3]) les jours où l'anomalie de pression est classée dans chacun des régimes. Pour chaque régime, on compte alors le nombre de jours associés où la température a excédé le 95^{ème} quantile de la distribution (le 95^{ème} quantile correspond à la température dépassée par seulement 5 % des jours dans la série complète). La *figure 1*

montre que la probabilité que le jour associé aux régimes de blocage et de dépression atlantique respectivement soit un jour chaud est forte. L'anomalie négative de pression du régime « dépression Atlantique » induit une advection d'air chaud depuis le Maghreb et l'Atlantique sud, tandis que l'anomalie positive du blocage sur le Royaume Uni limite la pénétration de l'air marin sur l'Europe.

● **II.2 VERIFICATION DU LIEN LORS DES CANICULES HISTORIQUES**

Afin de vérifier ce lien, le pourcentage d'occurrence de chacun des quatre régimes a été vérifié lors des canicules historiques de 1950, 1976, 1983, 1994 et 2003. Les résultats, résumés dans le *tableau 1*, montrent que les régimes rencontrés majoritairement ces étés là correspondent bien aux régimes de « dépression Atlantique » et de « blocage », précédemment identifiés comme préférentiellement associés à l'occurrence de jours chauds. Lors de la canicule exceptionnelle de 2003 en particulier, le mois de Juin est globalement dominé par l'occurrence du régime de « dépression Atlantique » (24 jours sur les 25 classés sur ce mois), alors que la première moitié du mois d'Août est dominée par des conditions de blocage persistantes.

● **II.3 LIEN POSSIBLE AVEC L'ATLANTIQUE TROPICAL**

Ainsi, si l'occurrence d'un de ces deux régimes peut être anticipée, alors la possibilité d'une canicule pourrait être anticipée. La prévisibilité aux moyennes latitudes est souvent associée à des forçages tropicaux, plus prévisibles. La contribution possible de l'Atlantique tropical dans l'occurrence de la canicule de 2003 a donc été étudiée. En effet, parallèlement, la saison des pluies au Sahel en 2003 est la 3^{ème} plus humide depuis 1960 [4]. Cette intensification de la saison des pluies est liée à un déplacement général vers le nord de la zone de convergence intertropicale (ITCZ pour Inter Tropical Convergence Zone en anglais). Pour tester

cette relation, des simulations ont été effectuées avec le modèle climatique du NCAR couplé à une couche océanique simple. Une simulation couplée de contrôle de 120 ans a été effectuée et sert de référence. On vérifie notamment que la fréquence d'occurrence des régimes de temps d'été est correctement reproduite. Ensuite, un ensemble de 40 simulations de 6 mois, débutant le 1^{er} avril, a été réalisé en imposant à partir du 15 Mai les conditions atmosphériques rencontrées en 2003 sur la zone tropicale et responsables du déplacement de l'ITCZ. La comparaison de l'occurrence des régimes de temps dans cet ensemble de simulations perturbées par rapport à la simulation de contrôle a montré qu'une perturbation tropicale analogue à celle de l'été 2003 conduit effectivement à augmenter la fréquence d'occurrence des régimes associés à des anomalies chaudes sur la France : le régime de « dépression Atlantique » en Juin et le régime de blocage en Août (*figure 2*). Si ce lien est confirmé et si les modèles climatiques sont capables de le reproduire correcte-

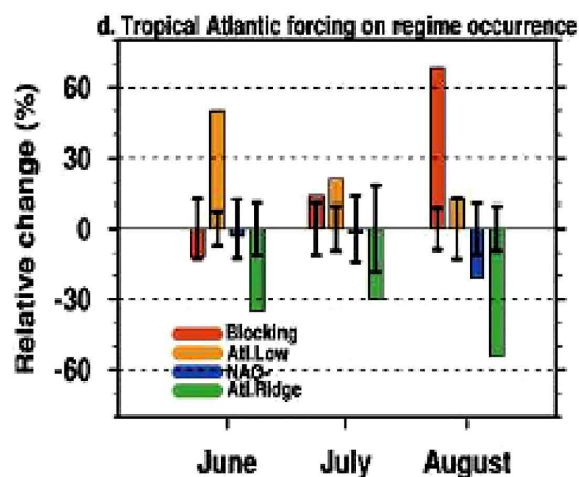


Figure 2 : Changement relatif (%) de l'occurrence des 4 régimes dû au forçage atmosphérique prescrit dans le modèle

Tableau 1 : pourcentage d'occurrence de chaque régime pour les 5 étés les plus chauds en France depuis 1950

Année (anomalie de température)	Régimes chauds			Régimes froids		
	Blocage	Dépression Atlantique	Total	NAO-	Dorsale Atlantique	Total
Occurrence moyenne	18	17	35	18	18	36
2003 (+3.2°C)	20	40	60	15	0	15
1976 (+2.2°C)	37	25	62	0	7	7
1950 (-2.0°C)	0	45	45	18	10	28
1983 (+1.4°C)	43	0	43	0	32	32
1994 (+1.0°C)	24	32	56	0	14	14

ment, il représente donc une piste intéressante pour l'anticipation de ces événements.

III ■ IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le lien précédemment identifié entre régimes de temps et probabilité d'occurrence de jours chauds peut également être exploité pour analyser les impacts possibles du changement climatique, en faisant l'hypothèse que d'une part, les régimes ne changent pas mais seules leurs fréquences d'occurrence évolue et que d'autre part, le lien entre les régimes et le climat local n'est pas modifié. L'analyse a été conduite à partir des résultats de 15 modèles ayant contribué au dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC AR4, 2007). Pour ces 15 modèles, deux périodes ont été considérées : 1960-1990 et 2080-2099, cette dernière période étant obtenue en utilisant le scénario d'émission intermédiaire SRES-A1B. Les résultats d'une simulation haute résolution avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (ARP sur les figures) sont également utilisés.

● III.1 LE LIEN ENTRE REGIMES DE TEMPS ET TEMPERATURE ET PRECIPITATIONS

A partir d'une même classification des champs de pression de la réanalyse NCEP-NCAR sur la période 1948-2006, les quatre régimes d'été sont associés aux anomalies de température et de précipitations sur l'Europe [1]. Le régime de dorsale atlantique, caractérisé par une anomalie positive de pression sur l'Atlantique et une anomalie cyclonique sur le nord de l'Europe, induit un renforcement du flux de nord-ouest sur l'Europe du nord et y favorise des conditions humides et froides. Le régime NAO- et ses anomalies de pression positives sur le Groenland et faiblement négatives sur l'Europe favorise les flux de nord est sur l'Europe et entraîne également des conditions humides et froides sur l'Europe du nord. Les deux autres régimes sont chauds et secs sur la France : l'anomalie négative de pression sur l'Atlantique dans le régime « dépression Atlantique » induit une advection d'air chaud depuis le Maghreb et l'Atlantique sud, tandis que l'anomalie positive sur le Royaume Uni du régime de blocage limite la pénétration de l'air marin sur l'Europe. Cependant, les anomalies de précipitations et de température associées aux régimes sont moins fortes en été qu'en hiver. La fréquente nature convective des précipitations en été fait que le lien entre circulation atmosphérique de grande échelle et précipitations est plus faible. La vérification de ce lien entre régimes de temps et précipitations dans les modèles climatiques fait apparaître le fait que les modèles ont tendance à sous-estimer le rôle de la circulation atmosphérique dans la variabilité des précipitations, particulièrement en été. Il est par conséquent probable qu'ils sur-estiment parallèlement le rôle des mécanismes thermodynamiques.

● III.2 L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Afin que la référence des régimes de temps soit la même pour toutes les simulations, les champs de pression calculés

par les différents modèles sont tout d'abord interpolés sur la grille des réanalyses NCEP et projetés dans l'espace des 10 premières composantes principales de la réanalyse. Ensuite, la pression est classée dans les régimes de temps en minimisant la distance au centroïde des régimes de la réanalyse. Ainsi, la référence en terme de régime est la même pour tous les modèles, aussi bien pour la période présente que pour la période future, ce qui permet de comparer les fréquences d'occurrence entre modèles et entre périodes. La figure 3 synthétise les résultats des changements de fréquence d'occurrence des régimes entre la fin du siècle et la période actuelle, pour tous les modèles et pour la moyenne d'ensemble (IPCC ensemble). Alors que certains modèles simulent des changements de circulation atmosphérique très importants (modèle du GFDL par exemple), d'autres ne simulent quasiment aucune modification (modèle de l'INGV ou du MRI). Globalement néanmoins, on constate en moyenne une augmentation de la fréquence des régimes de blocage et de dorsale atlantique, et une diminution des régimes de NAO- et de dépression atlantique. Ainsi, pour la France, un régime chaud et sec devient plus fréquent (le régime de blocage) et le régime le plus froid et humide (NAO-) devient moins fréquent. Bien que le deuxième régime chaud et sec (dépression Atlantique) devienne moins fréquent, au final, sur la France comme sur le Royaume Uni ou le Bénélux, les changements de régime en été vont dans le sens d'une diminution des précipitations. Pour l'Espagne, en revanche, ce n'est pas le cas, bien que les modèles y simulent une diminution de précipitations. Des modifications dynamiques à l'intérieur des régimes ou bien d'autres phénomènes liés aux rétroactions locales doivent jouer dans ces régions. En effet, une analyse de la variabilité intra-régimes a mis en évidence un lien fort entre précipitations et température : plus le jour est chaud, plus il est sec. Or, ce lien n'est pas expliqué par la seule intensité de l'anomalie de pression dans le régime, il fait donc intervenir d'autres mécanismes, liés par exemple

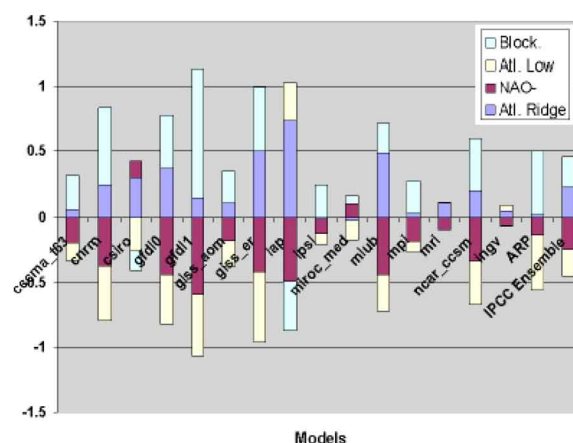


Figure 3 : Changements relatifs de la fréquence d'occurrence des 4 régimes d'été entre les périodes 1961-1990 et 2081-2099 dans différents modèles du GIEC et le modèle ARPEGE-Climat haute résolution (ARP). La moyenne d'ensemble des modèles du GIEC est aussi indiquée (IPCC ensemble)

à l'humidité du sol, à la stabilisation de la couche limite ou à la plus grande capacité de l'air chaud à contenir de l'humidité, rendant la condensation plus difficile à atteindre si les sources d'humidité ne sont pas suffisantes. Par ailleurs, les anomalies de température et de précipitations associées aux régimes peuvent être fortement modulées en fonction de l'historique de la circulation des jours (ou semaines) précédents : les anomalies liées aux régimes chauds et secs sont plus importantes les années où ces régimes sont le plus souvent excités. Il y a donc un effet de mémoire, vraisemblablement lié à l'humidité du sol. Les valeurs climatologiques de l'humidité des sols dans le climat présent ont un rôle majeur sur les changements de l'évaporation sur la France dans le climat futur. Or, les changements d'évaporation sur la France sont très incertains, même simplement en terme de signe. Certains modèles sous-estiment le rôle limitant de l'humidité des sols sur l'évaporation en été, ce qui pourrait les conduire à simuler des augmentations d'évaporation irréalistes et par conséquent des augmentations de température et des diminutions de précipitations trop faibles.

IV ■ CONCLUSIONS

La notion de régimes de temps est utilisée pour estimer la probabilité d'occurrence de conditions de canicule-sècheresse en France et en Europe en été. En effet, même si le lien est moins fort qu'en hiver, la circulation atmosphérique de grande échelle favorise, dans certaines configurations, l'apparition de jours chauds et secs. Ce lien peut ainsi être exploité d'une part dans un but de prévision saisonnière et d'autre part, pour analyser l'impact du changement climatique. L'identification de précurseurs ou de conditions de forçages favorables à l'excitation des régimes chauds et secs permet d'espérer une prévisibilité de ce phénomène à l'échelle saisonnière, à condition que les modèles reproduisent correctement ces mécanismes. En ce qui concerne le changement climatique, l'analyse montre qu'un régime chaud

et sec devient plus fréquent, alors que le régime le plus froid et humide le devient moins, ce qui, globalement, devrait conduire à des étés plus chauds et plus secs. La circulation atmosphérique de grande échelle n'explique cependant pas à elle seule l'occurrence des sécheresses. Les rétroactions locales, notamment liées à l'humidité du sol, jouent un rôle crucial. Or, les modèles climatiques représentent diversement ce phénomène et ses implications sur la température et les précipitations. Il y a fort à craindre que certains modèles sous-estiment l'effet limitant de l'humidité du sol sur l'évaporation, sous-estimant de fait l'augmentation de température et la diminution de précipitations. Ainsi, s'il semble clair que les étés à venir seront globalement plus chauds et plus secs, l'intensité de ces modifications reste incertaine.

V ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] BOE J. (2007) — *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France* : Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse.
- [2] CASSOU C., TERRAY L., PHILLIPS A.S. (2005) — Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves. *Journal of Climate*. **18** 2805-2810
- [3] KLEIN TANK A. M. G., COAUTHORS (2002) — Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*. **22** 1441-1453
- [4] LEVISON D.H., WAPLE A.M. (2004) — State of the climate in 2003. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **85** S1-S72
- [5] MICHELANGELI P.A., VAUTARD R., LEGRAS B. (1995) — Weather regimes : Recurrence and quasi stationarity. *Journal of the Atmospheric Sciences*. **52** 1237-1256
- [6] VAUTARD R. (1990) — Multiple weather regimes over the North Atlantic : Analysis of precursors and successors. *Monthly Weather Review*. **118** 2056-2081