

Working Note

WN/CGMC/03/126

**La vague de chaleur de l'été 2003
et sa prévision saisonnière**

La vague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière

Jean-Claude ANDRE¹, Michel DEQUE², Philippe ROGEL¹, Serge PLANTON²

¹ CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), 31 057 TOULOUSE cedex 1

² Météo-France / CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), 31 057 TOULOUSE cedex 1

1. Introduction

L'objet de cette note est d'examiner dans quelles conditions la vague de chaleur qui a sévi sur l'Europe de l'ouest (principalement de la France à l'Autriche et de l'Italie à l'Allemagne) au cours de l'été 2003 (par périodes successives de quelques jours à quelques semaines, dont une canicule exceptionnelle qui a surtout touché la France entre le 3 et le 14 août) était prévisible au sens de la prévision saisonnière, c'est-à-dire avec un à trois mois d'échéance.

Rappelons (cf. par exemple André *et al.*, 2002) que les échéances de la prévision saisonnière se situent:

- au-delà de la durée de prévisibilité déterministe (de l'ordre de une à deux semaines selon le type de situation), durée en deçà de laquelle les prévisions déterministes "classiques" sont possibles, et effectuées quotidiennement par les services météorologiques ;
- en deçà des échéances des prédictions climatiques, qui se donnent quant à elles pour objectif de dégager les tendances du climat futur, pour des échéances pluri-annuelles et surtout décennales et pluri-décennales.

La prévision saisonnière a en effet comme objectif de tirer parti du possible caractère prévisible de certaines propriétés statistiques de l'atmosphère, que cette prévisibilité soit due

- à des interactions avec des anomalies de la température de surface de l'océan (SST) dont la durée de vie est typiquement de quelques mois ;

- à des interactions avec des anomalies des propriétés des surfaces continentales (humidité, couverture neigeuse, ...) dont la durée de vie est pratiquement du même ordre, anomalies d'autant plus importantes qu'elles peuvent être la source de mécanismes de rétroaction positive, comme par exemple dans le cas de la couverture neigeuse ;

- ou encore à des mécanismes atmosphériques intrinsèques (modes de variabilité interne).

Cette prévisibilité est mise en évidence en réalisant des ensembles de simulations atmosphériques couplées (à la SST, aux propriétés de surface) et en examinant les caractéristiques statistiques de l'atmosphère prévues quelques mois plus tard.

La possibilité de prévoir plusieurs semaines à l'avance le caractère anormalement chaud et sec d'étés tels que celui de 2003 serait en effet d'une importance capitale du fait des mesures de précaution qu'elle permettrait probablement de mettre en place, évitant ainsi une partie des lourdes conséquences sociales et économiques de ces événements.

Dans cette note on examinera successivement

- l'événement "vague de chaleur 2003", pour en rappeler les principales caractéristiques en termes d'intensité et de caractère exceptionnel ;
- les résultats obtenus par les méthodes de prévision saisonnière actuellement en opération, régulière ou sous un mode "recherche" ;
- la structure de la SST dans l'Atlantique, telle que documentée par des analyses océaniques spécifiques ;
- les possibles liens entre la structure de la SST et de tels épisodes de vague de chaleur, documentés entre autres à partir de l'analyse d'événements antérieurs ;
- la mise en évidence de mécanismes permettant une meilleure prévisibilité à quelques mois d'échéance, documentée par des prévisions refaites *a posteriori* (simulations dites en mode "hindcast").

2. Analyse météo-climatique de la vague de chaleur de l'été 2003

La vague de chaleur de l'été 2003 s'est traduite par des anomalies de température de l'air en surface dépassant de 3 à 5 degrés les normales saisonnières sur l'essentiel de la France, de l'Allemagne et de l'Italie, et jusqu'aux frontières orientales de l'Autriche, de la Croatie et de la Bosnie. Toutefois, cette vague n'a pas été continue tout au long de la saison puisqu'elle s'est manifestée en France notamment par trois périodes de plus fortes chaleurs au cours de la dernière semaine de juin, puis vers la mi-juillet et enfin et surtout pendant la première quinzaine d'août. Au cours de cette dernière période, normalement caractérisée par des températures moyennes proches de l'extrême annuel de la fin juillet, les températures maximales journalières se sont élevées en France d'environ 12° au-dessus des normales et de 6° pour les températures minimales journalières, et ceci pendant 10 jours consécutifs. C'est cette durée exceptionnelle qui fait de cet épisode de canicule le plus intense jamais observé depuis que les mesures de température sont collectées de façon régulière (deuxième moitié du dix-neuvième siècle, cf. Moisselin *et al.*, 2002), même si les records journaliers de température n'ont pas été systématiquement battus sur l'ensemble des stations de mesures météorologiques. Plusieurs événements de fortes chaleurs se sont ainsi produits au cours des 20 dernières années (juillet 1983 dans le Sud-est, de manière répétée dans différentes régions au cours des années 90). Mais, du fait de son ampleur, l'événement d'août 2003 est plus comparable aux épisodes de fortes chaleurs des années 1976 ou 1947. Or, sur la période du 1^{er} juin au 31 août, l'année 2003 bat des records de chaleur avec une température moyenne en France dépassant d'environ 1,5° celle de 1976. Le nombre de jours où la température a dépassé le seuil de 35° est lui aussi exceptionnel. Par exemple sur cette période, Nîmes a subi au cours de l'été 2003 32 jours pendant lesquels la température est passée au-dessus de 35°C en cours de journée lorsque la moyenne n'est que de 4 jours, et que cela ne s'est produit, si l'on peut dire, que 12 fois en 1947.

La situation météorologique associée à ces vagues de chaleur est classique pour l'été, avec une dorsale de haute pression prolongeant l'anticyclone des Açores sur l'Europe de l'ouest. Le caractère singulier de cette situation est qu'elle a duré plusieurs semaines, en particulier au mois d'août, et qu'elle a amené de l'air très chaud et très sec en provenance du sud de la Méditerranée, près de la surface comme en altitude. Les hautes pressions ont par ailleurs formé un obstacle au passage des perturbations orageuses accentuant une phase de sécheresse qui avait débuté dès le printemps 2003. Les météorologues emploient le terme de blocage pour caractériser cette situation, un blocage qui a persisté beaucoup plus longtemps qu'habituellement.

Pour replacer l'été 2003 dans un contexte européen, la figure 1 montre l'anomalie¹ de température moyenne de JJA² de la surface isobare 850 hPa (vers 1500 m) afin de s'affranchir des effets de basse couche atmosphérique. La figure 1 montre des anomalies supérieures à 3°C sur la France. De telles valeurs n'ont pas été observées depuis 1958 (cf. *infra*). Les années les plus chaudes pour cette période sur la France sont, selon ce critère, 1976, 1983 et 1994. La figure 1 montre de plus que pour ces trois étés, non seulement, l'amplitude était plus faible (on n'atteint jamais 3°C sur l'Europe ou le proche Atlantique) mais aussi que l'étendue géographique de la zone d'anomalie chaude sur l'Europe était plus restreinte. En 1976, mémorable surtout par sa sécheresse sur l'ouest de la France, la Bretagne, le Pays de Galles et l'Ecosse sont les seules régions où l'anomalie thermique estivale dépasse 2°C. En 1983 c'est au tour de l'est de la France, et en 1984 au tour du sud du pays. Mais ce n'est qu'en 2003 que toute la France, mais aussi de nombreux pays d'Europe occidentale, connaissent une température 2°C au-dessus de la climatologie.

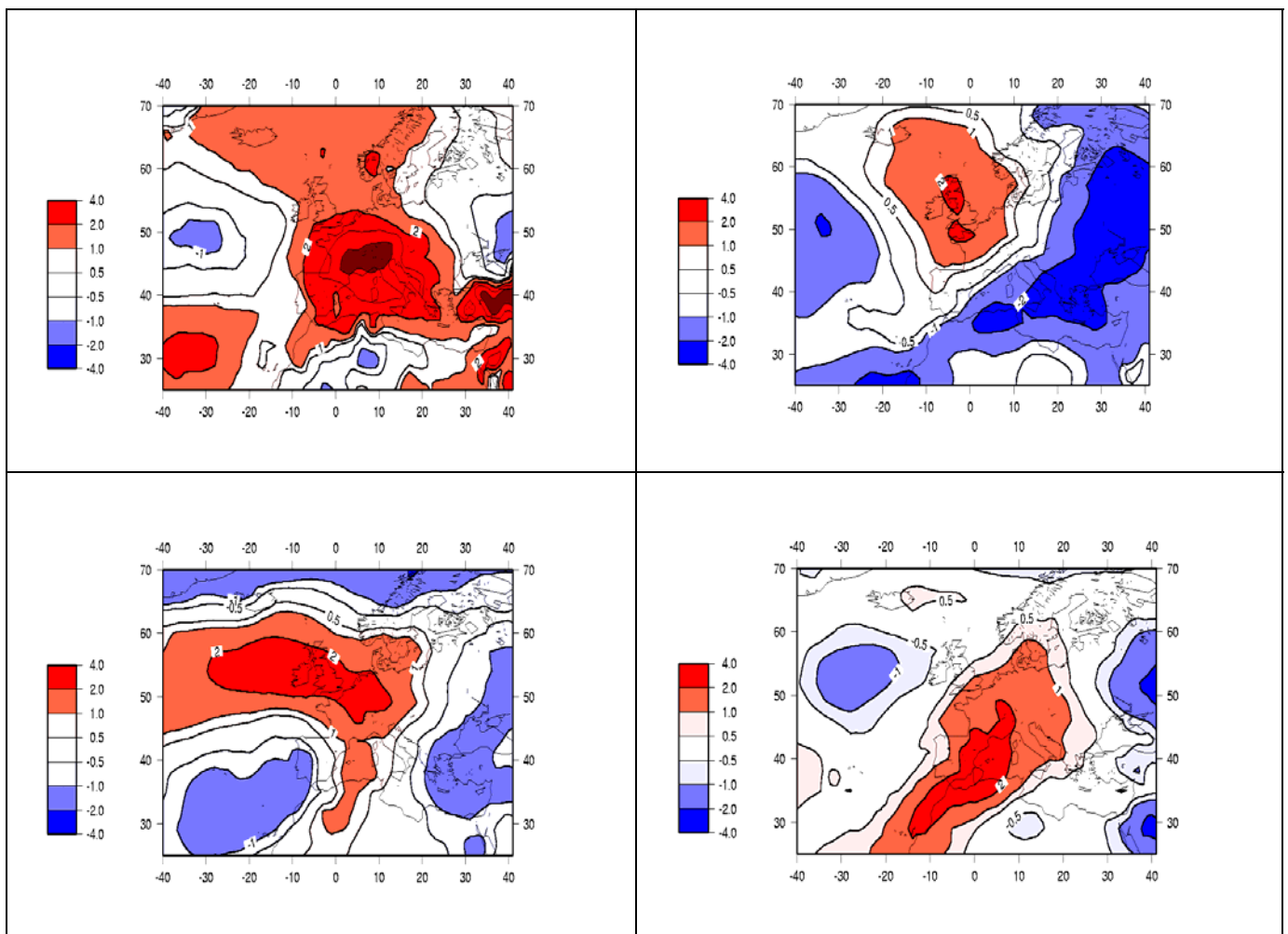


Figure 1 : Anomalie de température à 850 hPa en juin/juillet/août 2003 (en haut à gauche), en juin/juillet/août 1976 (en haut à droite), en juin/juillet/août 1983 (en bas à gauche), et juin/juillet/août 1994 (en bas à droite).

¹ L'anomalie est calculée par rapport à la climatologie telle que produite par la réanalyse dite "ERA-40" portant sur les 44 années de 1958 à 2002 (<http://www.ecmwf.int/research/era/>).

² Juin/Juillet/Août

3. Les performances des systèmes de prévision saisonnière actuels

Les figures 2 et 3 et le tableau 1 récapitulent les prévisions saisonnières de température effectuées en temps réel pour l'été 2003 par trois centres :

- CEPMMT³ : avec un modèle couplé océan-atmosphère et des simulations d'ensemble d'environ 30 membres (il est à noter que les prévisions concernant l'Europe sont en accès réservé);
- Met Office⁴ : avec un modèle couplé océan-atmosphère (différent) et des simulations d'ensemble comportant un nombre de membres non précisé ;
- IRI⁵ : prévision par consensus (consensus forecast) basée d'une part sur des simulations d'ensemble d'environ 30 membres réalisées à partir d'un «multi-modèle» atmosphérique (c'est-à-dire combinant plusieurs prévisions effectuées avec différents modèles, ce qui permet d'évaluer en même temps l'incertitude résultant de la connaissance imparfaite de la dynamique du climat), forcé par des SST prévues par une méthode hybride (c'est-à-dire combinant selon les régions océaniques plusieurs approches, dont des résultats de simulation couplée, de prévision statistique ou plus simplement encore la persistance des anomalies initiales), d'autre part sur toutes autres sortes de prévisions, statistiques, régionales, qui sont communiquées à ce Centre.

En résumé, le CEPMMT avait prévu un signal significatif dès avril, confirmé par la prévision de mai, mais celui-ci n'a pas été corroboré par la prévision suivante, réalisée en juin. Le modèle du UKMO n'a pas produit de prévision correspondant à une réelle anomalie chaude. L'IRI n'a pas prévu d'anomalie chaude dans ses prévisions réalisées en avril et mai, mais ses prévisions de juin sont beaucoup plus réalistes.

Il est à noter que Météo-France réalise parallèlement des prévisions saisonnières avec le même type de modalités et de calendrier, sans que celles-ci soient toutefois diffusées autrement qu'en interne ou à un petit nombre d'utilisateurs externes sélectionnés. Ces prévisions sont données à la figure 4. On y remarque que, de façon quelque peu semblable à ce qui a été produit par le CEPMMT, la prévision réalisée le 1^{er} mai montrait une forte anomalie chaude pour le trimestre juin/juillet/août, sans que toutefois cette prévision soit confirmée un mois plus tard pour le trimestre juillet/août/septembre.

³ Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
(<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/seasonal/charts/>)

⁴ Meteorological Office (<http://www.met-office.gov.uk/weather/seasonal/index.html>)

⁵ International Research Institute for Climate Prediction (USA)
(http://iri.columbia.edu/climate/forecast/net_asmt/2003/index.html)

Saison prévue et date de diffusion (2003)	CEPMMT	UKMO	IRI
JJA, prévision d'avril	Prob($T' > 0$) de l'ordre de 60% sur l'Europe de l'ouest et centrale (France, Allemagne, Italie du nord). Signature très nette de l'anomalie de SST de l'Atlantique nord.	Aucun signal sur l'Europe de l'ouest.	Léger signal sur l'ensemble de l'Europe (Prob($T' \uparrow 33\%$) de 40-45%), sauf France et Italie.
JJA, prévision de mai (cf Fig. 1)	Prob($T' > 0$) de 70-80%, Prob($T' \uparrow 15\%$) de 25-35% sur la France, l'Italie, l'Espagne	Aucun signal sur la France, l'Angleterre et l'Allemagne. Léger signal sur l'Ecosse. Prob($T' > 0$) de 60-80% sur l'Italie et la Grèce	Signal significatif sur la façade ouest de l'Europe, du Cap Nord au Portugal. Prob($T' \uparrow 33\%$) de 45-50% sur les îles Britanniques. Prob($T' \downarrow 33\%$) légèrement significatif sur l'Europe méditerranéenne.
JAS⁶, prévision de mai	Prob($T' > 0$) de 60-70%, Prob($T' \uparrow 15\%$) de 35-50% sur la France et l'Italie.	Aucun signal sur la France. Prob($T' \leq 0$) de 60-70% sur l'Allemagne et les pays baltes. Les signaux sur l'Ecosse et l'Europe du sud restent identiques.	Même schéma que ci-dessus.
JAS, prévision de juin (cf. Fig. 2)	Plus aucun signal sur la France et l'Europe centrale. Prob($T' \uparrow 33\%$) de 70% sur l'Europe du sud (sud de l'Espagne, Italie, Grèce) liée à des températures élevées en Méditerranée.	Prob($T' \leq 0$) de 60-70% sur la France. Le signal s'intensifie sur l'Ecosse et l'est de l'Angleterre.	Signal significatif sur l'ensemble de l'Europe. Les zones où Prob($T' \uparrow 33\%$) est la plus forte sont le nord de la France, le Bénélux et l'est de l'Angleterre, l'Espagne, et les Balkans.

Tableau 1 : Synthèse des prévisions saisonnières sur l'Europe de l'ouest réalisées en temps réel pour l'été 2003. Prob($T' > 0$) désigne la probabilité que la température moyenne sur la saison soit supérieure à la normale ; Prob($T' \uparrow X\%$) désigne la probabilité que la température moyenne sur la saison soit dans les X% les plus chaudes.

⁶ juillet-août-septembre

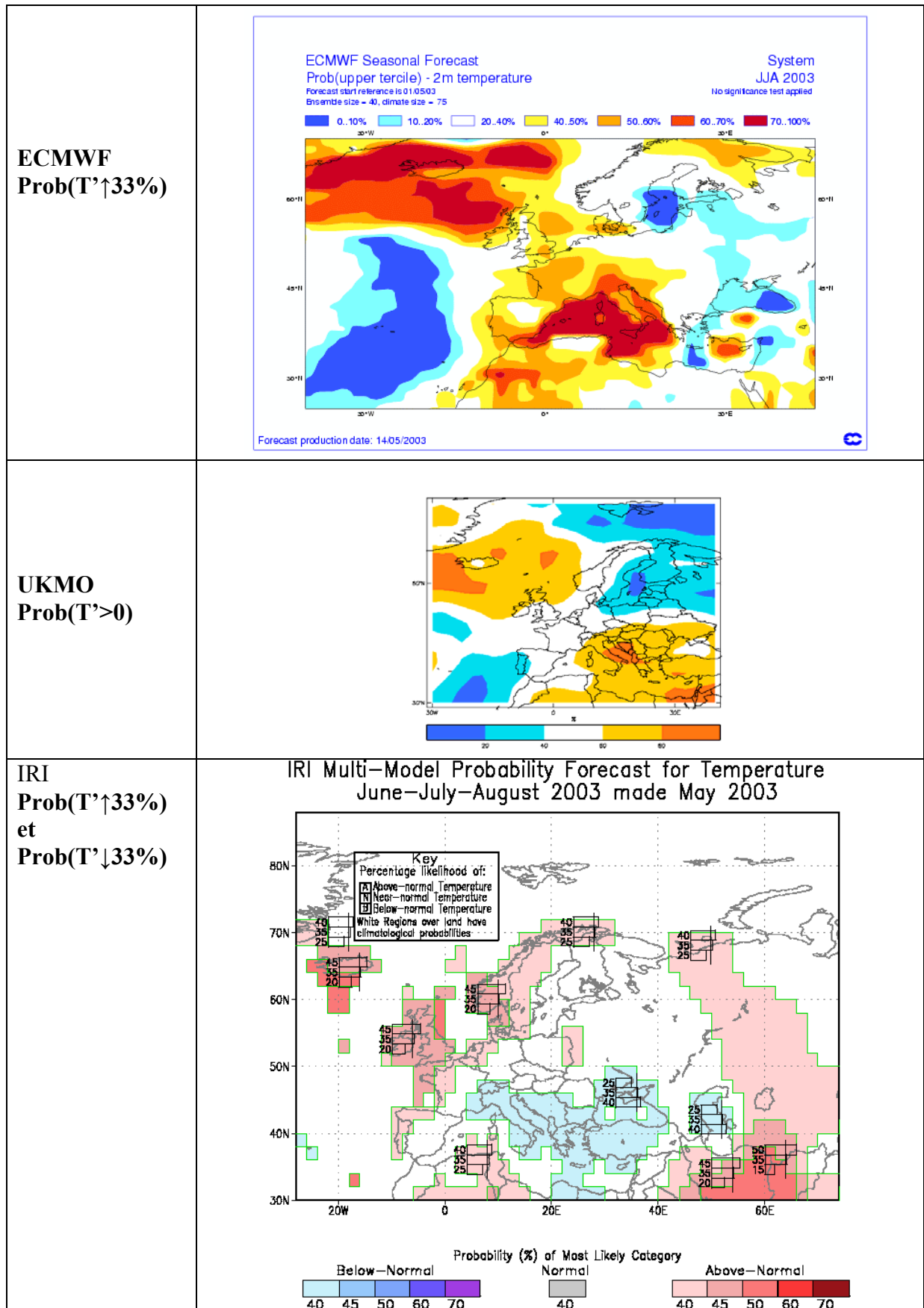


Figure 2 : Prévisions réalisées en mai pour la période juin-juillet-août (2003)

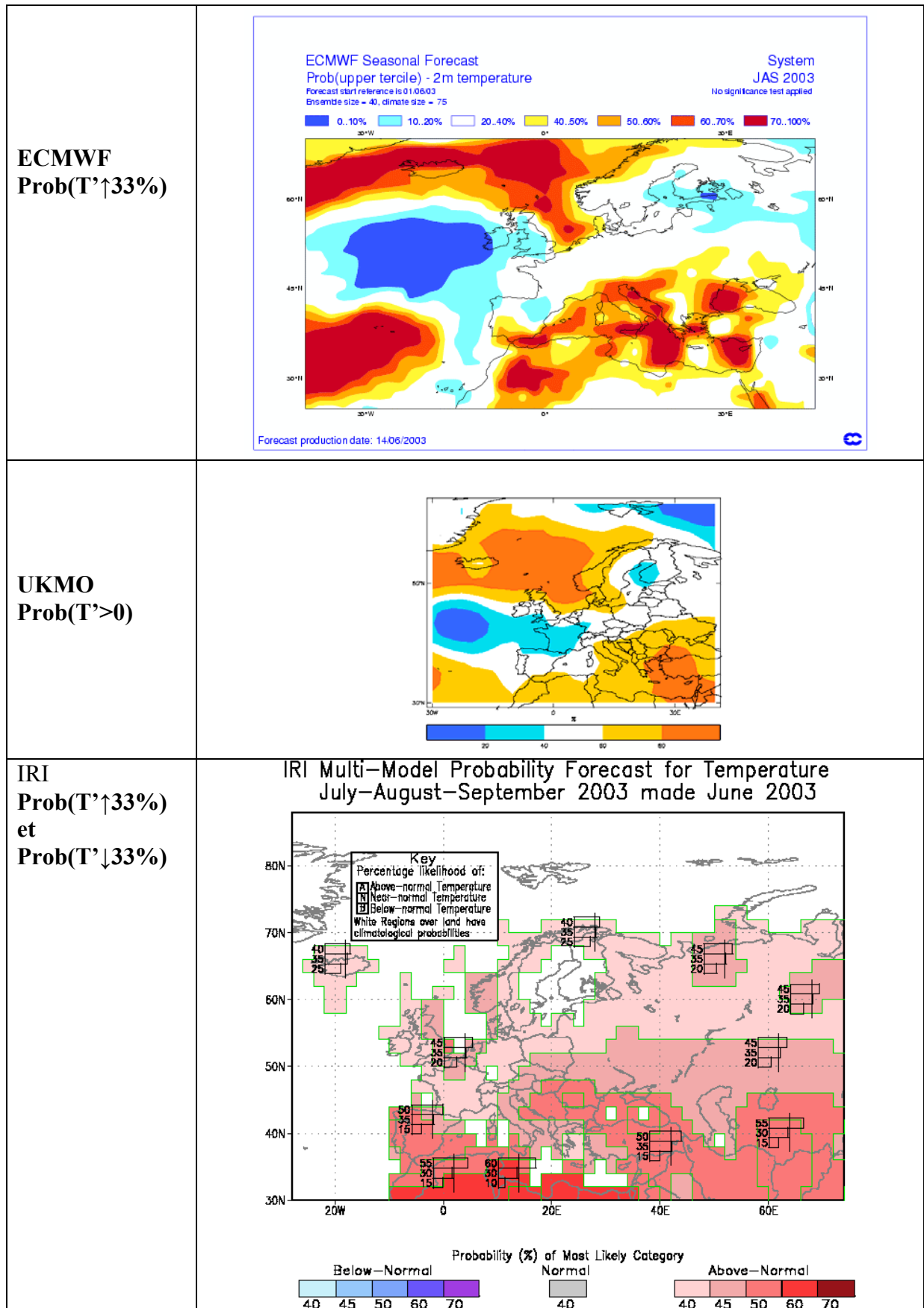


Figure 3 : Prévisions réalisées en juin pour la période juillet-août-septembre (2003)

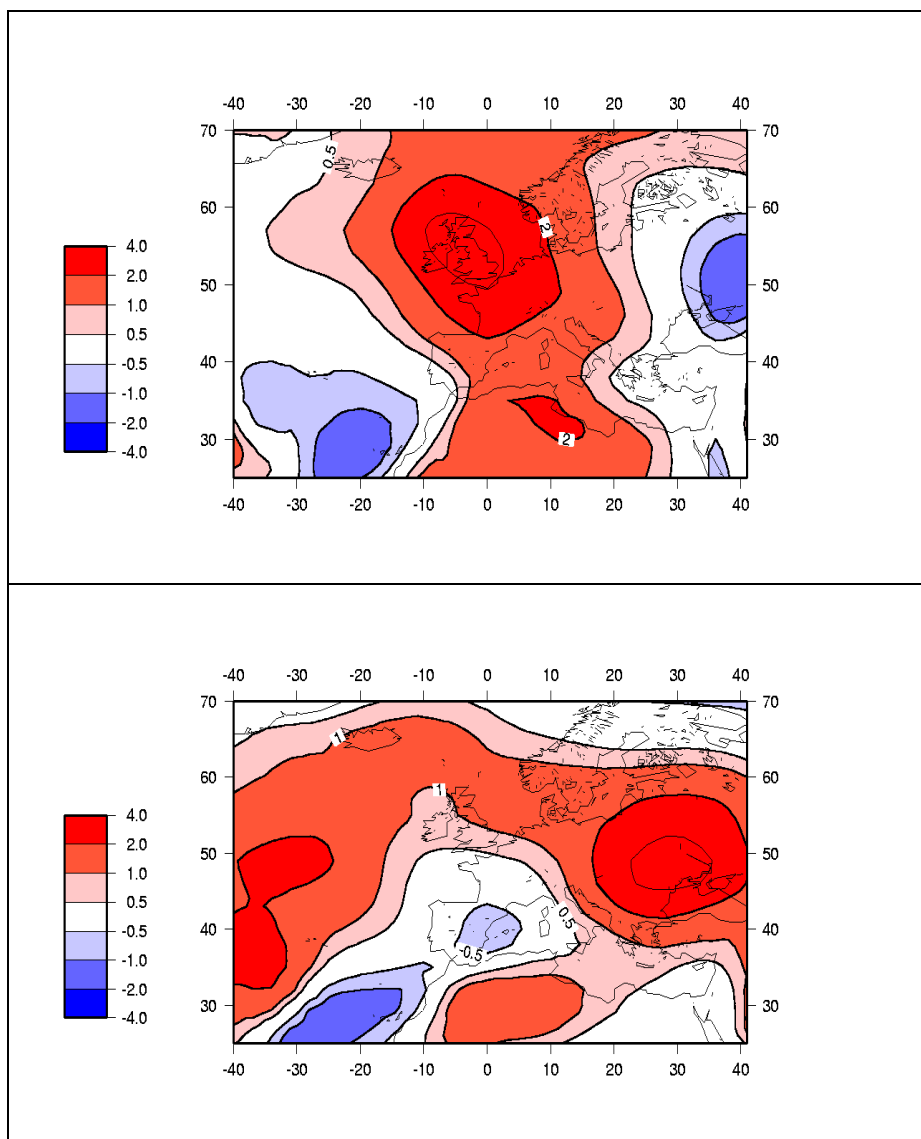


Figure 4 : Prévisions réalisées par Météo-France : début mai pour la période juin-juillet-août 2003 (en haut), et début juin pour la période juillet-août-septembre 2003 (en bas)

4. Analyse de la SST

Au-delà des comparaisons faites à la Section 2 entre les vagues de chaleur des années 1976, 1983, 1994 et 2003, la vague de chaleur de l'été 2003 a pour point commun avec celle de 1976 d'avoir été précédée par un printemps au cours duquel la zone de convergence intertropicale (ZCIT) était très au nord par rapport à sa position habituelle. On revient sur ce point au paragraphe 6. Un autre point commun (partagé également avec 1947) est la présence d'une anomalie de température de surface de l'océan Atlantique très spécifique, perceptible dès avril, mais dont l'intensité est maximale en juillet. Cette anomalie de surface (Figure 8) est négative dans une zone très étendue allant du large de Terre-Neuve au large de l'Irlande, et de 40°N à 55°N environ, et positive autour de cette zone, en particulier entre l'Europe du nord et le Groenland, ainsi que le long d'une langue partant de l'Espagne et s'étendant en direction du sud-ouest jusque vers 50 W.

Le caractère très exceptionnel de cette anomalie peut être vérifié à la Figure 9, où l'année 2003 apparaît très clairement comme une année exceptionnelle dans une analyse en fonction des 2 composantes principales de l'anomalie de SST Atlantique (en bas à droite du graphique). Les 104 derniers étés depuis 1900 forment un nuage de points très complexe lorsqu'on veut tenir compte des distances entre toutes les paires d'années (écarts quadratiques moyens sur l'Atlantique Nord). L'analyse de proximité (Rencher, 2002) est une technique d'analyse statistique de données qui permet de représenter les positions relatives des points d'un tel nuage dans un petit nombre de dimensions (ici deux) en altérant le moins possible, au sens des moindres carrés, les interdistances. La Figure 9 montre donc une projection des moyennes de JJA, mais une projection des moyennes de juin seul montrerait la même chose: l'été 2003 se situe à une extrémité du nuage et n'offre pas de situations analogues proches au cours du 20^{ème} siècle. Lorsque l'on corrèle les SST de l'Atlantique nord de l'été 2003 (JJA) à celles des années correspondant aux 3 principaux événements de la deuxième moitié du siècle, on trouve des valeurs supérieures à 0,50 pour 1976 et 1994, mais pas 1983. Dans les deux cas corrélés on obtient, comme sur la Figure 8, une anomalie froide au centre de l'Atlantique entourée d'anomalies chaudes.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que l'été 2003 se caractérise par l'absence de fort signal ENSO⁷ dans le Pacifique tropical, où les anomalies ont été faiblement négatives au printemps avant de revenir à la normale en juillet. En revanche, l'océan Indien présente des anomalies de SST marquées entre l'ouest et l'est du bassin, auxquelles est associée une perturbation sensible des régimes de mousson. Leur rôle dans la tendance au réchauffement de l'hémisphère nord est suggéré par certaines études (Farrara *et al.*, 2000).

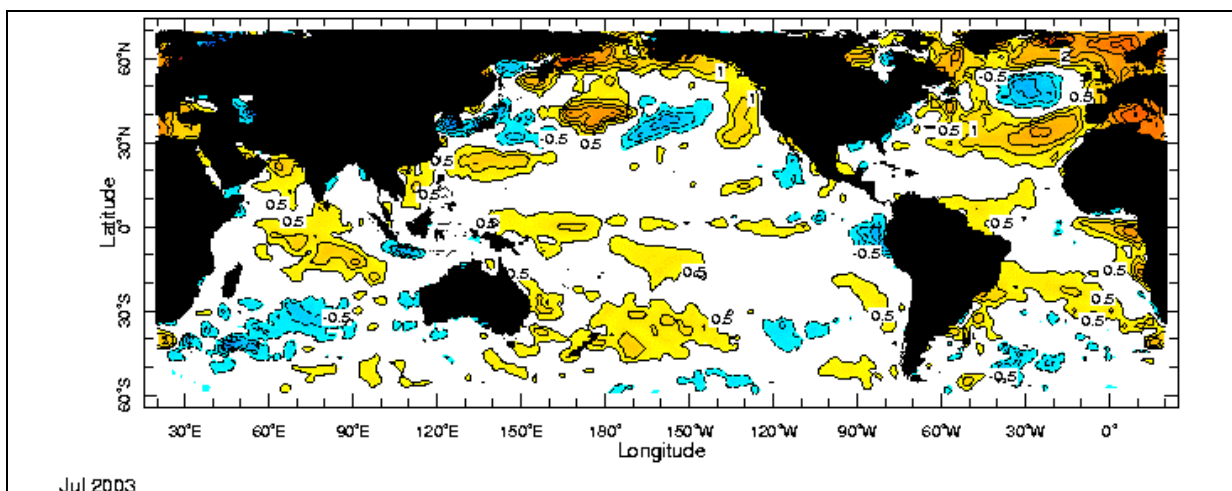


Figure 8 : Anomalie de température de surface de la mer en juillet 2003 par rapport à la moyenne climatique 1971-2000 (Reynolds et Smith⁸)

⁷ El Niño Southern Oscillation

⁸ <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.noaa.oisst.v2.html>

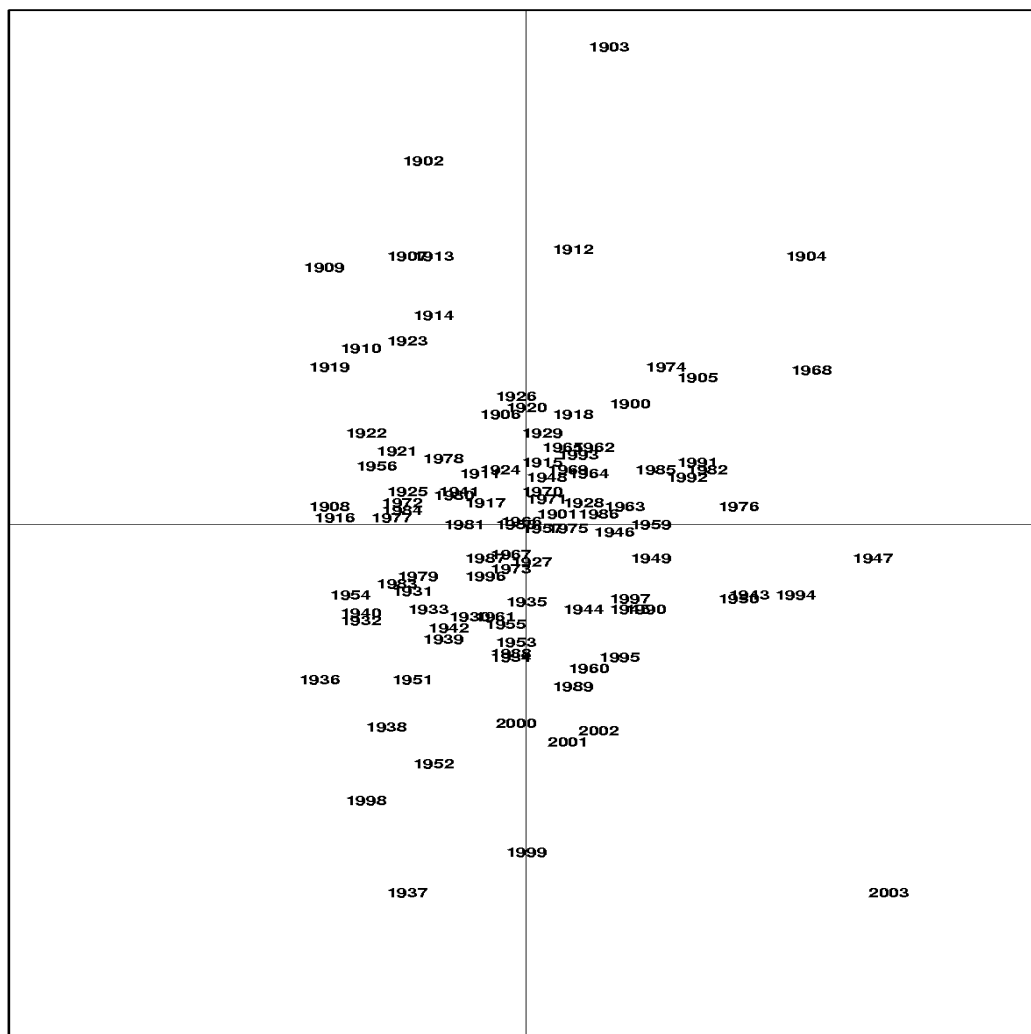


Figure 9 : Analyse selon les deux premières composantes principales de l'anomalie de SST Atlantique durant juin/juillet/août 2003

Au-delà de ces aspects liés seulement à l'anomalie moyenne observée tout au cours de l'été 2003, il est intéressant de suivre la chronologie d'apparition de cette anomalie. Celle-ci est donnée à la figure 10, selon les analyses réalisées *a posteriori* par MERCATOR-Océan⁹. Il apparaît ainsi que dès le mois d'avril l'anomalie froide de SST était déjà en place, avec une intensité assez forte, de l'ordre de 2°C en moyenne mais pouvant atteindre plus de 3°C en quelques endroits. Cette anomalie subsiste en mai, juin et juillet, avec une intensité toujours aussi forte, avant de se dissiper assez rapidement en août. Il est à noter que des analyses des anomalies de SST réalisées mensuellement par Reynolds et Smith (et dont un exemple est donné à la figure 8) conduisent au même type de chronologie, bien qu'avec quelques différences concernant la géographie (en particulier au large de Terre-Neuve) et l'intensité des anomalies (un peu plus forte du fait d'une période de référence plus longue que dans le cas de MERCATOR-Océan).

⁹ <http://www.mercator-ocean.fr>

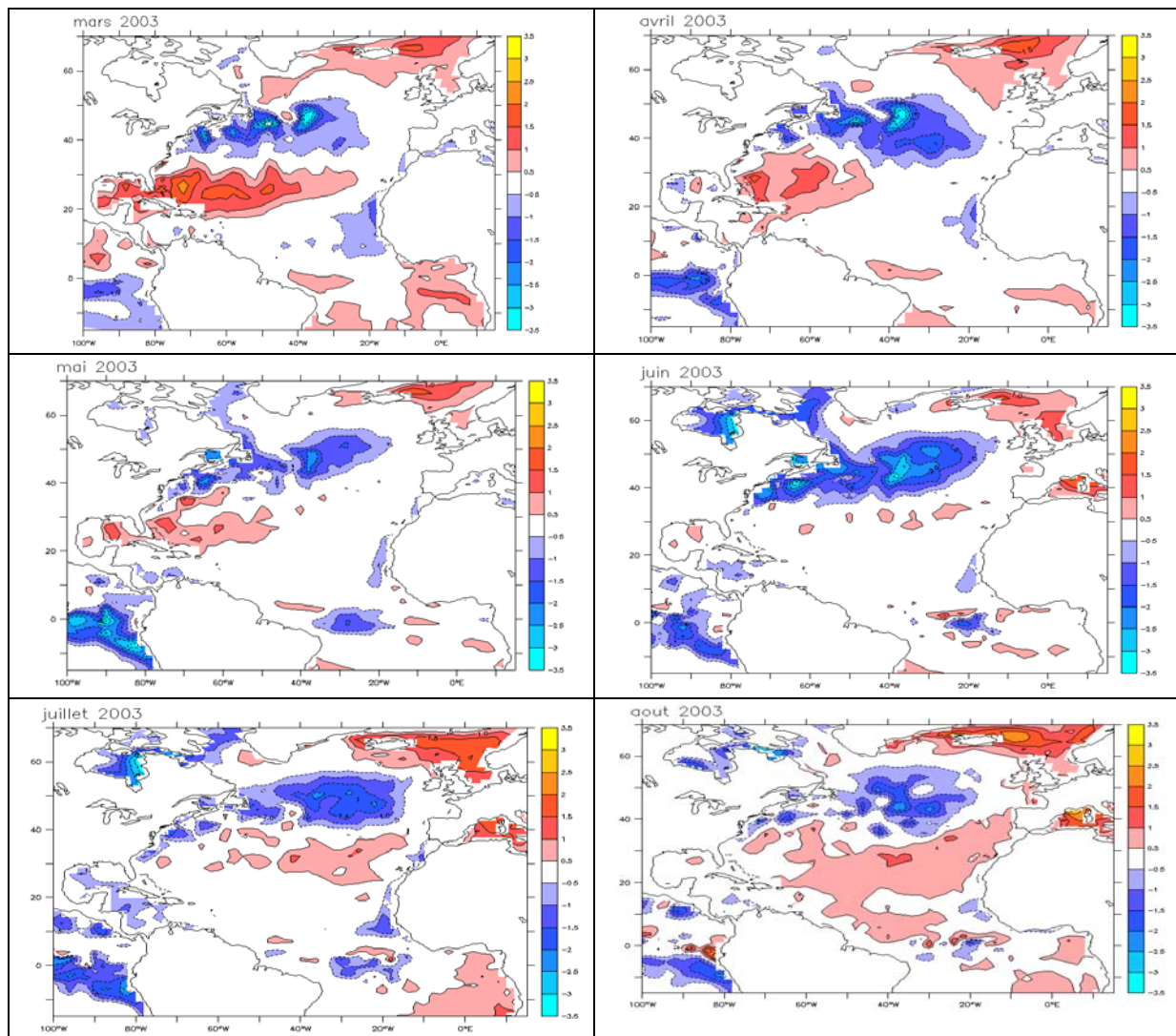


Figure 10 : Chronologie de l'apparition de l'anomalie de SST au cours du printemps-été 2003, telle qu'analysée par MERCATOR-Océan

5. Prévisibilité en mode «hindcast»

Afin de comprendre pourquoi les modèles opérationnels utilisés n'ont pas permis de parvenir à une prévision correcte de la vague de chaleur de l'été 2003, et afin de juger si ces insuffisances sont ou non liées à une mauvaise prise en compte de l'anomalie de SST, une série d'expériences de prévision rétrospective ont été réalisées avec le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (Déqué, 2001), expériences dans lesquelles la température de surface de l'océan est prescrite selon les observations. Le résultat est donné à la figure 11, où apparaît clairement que la connaissance exacte de la température de surface n'aurait pas permis d'améliorer la prévision de l'événement 2003. En effet, même si le signe de l'anomalie est correctement simulé pour l'année 2003, la comparaison des signes des anomalies prévues et observées sur les 45 ans montre que ce résultat pourrait avoir été obtenu par simple hasard. Le modèle reproduit en effet le signe de l'anomalie observée dans 56% des cas, soit seulement légèrement plus que la probabilité de l'obtenir par tirage aléatoire. L'amplitude de l'anomalie est quant à elle fortement sous-estimée. On note par ailleurs à la figure 11 que l'événement 2003 est bien d'une amplitude exceptionnelle comparée aux autres étés chauds enregistrés

depuis 1958.

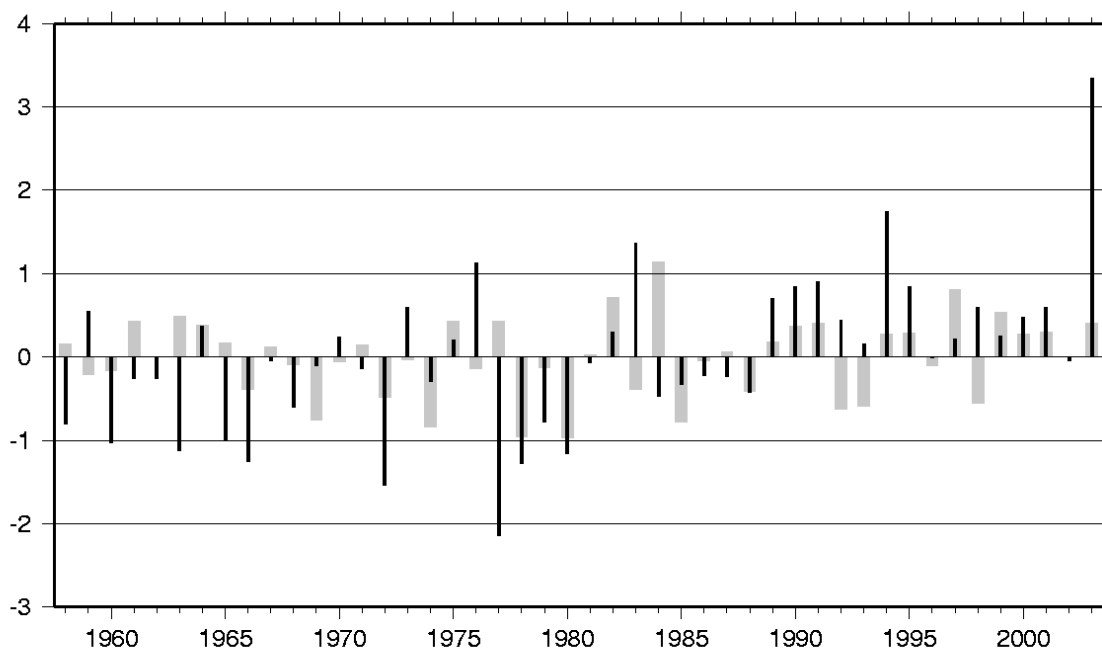


Figure 11 : Expériences de prévision en mode rétrospectif des anomalies de température en JJA à 850 hPa sur la France (°C) pour l'ensemble des étés depuis 1958. Barres grisées : prévisions rétrospectives ; barres noires : valeurs observées.

6. Mécanismes et processus mis en jeu

Pour expliquer le phénomène 2003, et éventuellement parvenir à le prévoir, il est donc nécessaire de chercher au-delà d'une action de l'océan sur l'atmosphère se réduisant à décrire l'influence "sous le vent" d'une anomalie de température de surface océanique.

Il faut pourtant signaler que les toute récentes analyses de Rodwell *et al.* (2003) confirment que la structure de SST Atlantique observée en 2003 est d'un type susceptible d'être accompagné d'une réponse atmosphérique de nature semblable à celle observée au-dessus de l'Europe au cours de l'été 2003. Ces analyses étant réalisées de manière statistique sur la base de simulations à l'aide d'un multi-modèle atmosphérique, les corrélations observées entre situation océanique et réponse atmosphérique peuvent toutefois résulter de mécanismes beaucoup plus complexes que la simple "influence sous le vent". Ces analyses n'en confirment pas moins le rôle important de l'anomalie de SST Atlantique comme indicateur d'une situation à forte réponse atmosphérique.

Afin de contribuer à identifier les processus plus complexes mis en jeu dans un épisode tel que celui de l'été 2003, une étude vient d'être réalisée par C. Cassou en utilisant le modèle du NCAR¹⁰, proposant un mécanisme reliant l'anomalie de SST Atlantique à une position trop anormalement au nord de la ZICT. Ce modèle offre en effet la possibilité d'être contraint par

¹⁰ National Center for Atmospheric Research (USA)

la position observée de la ZCIT, permettant ainsi de simuler l'influence de la variabilité tropicale sur les latitudes moyennes, à la fois dans l'atmosphère et dans l'océan superficiel. Ce modèle montre ainsi que la position trop anormalement au nord de la ZCIT en mai peut créer à la fois :

- une anomalie de SST aux latitudes moyennes, du type de celle observée en juin 2003, via un mécanisme complexe de propagation vers l'Atlantique nord-est ;
 - une anomalie chaude de la température de l'air au-dessus de l'Europe de l'ouest, accompagnée d'un doublement de la probabilité pour des températures supérieures à 28°C.
- Néanmoins, les résultats de ces simulations doivent encore être pris avec précaution. En particulier, ils ne permettent pas d'expliquer totalement la variance observée. Ce mécanisme suggère que l'anomalie de SST observée n'est pas d'origine océanique mais qu'elle a été forcée par l'atmosphère.

7. Conclusion

Il apparaît à l'issue de cette première analyse des performances des modèles de prévision saisonnière que l'événement "vague de chaleur 2003" met en jeu de nombreux mécanismes tant atmosphériques qu'océaniques, et que sa prévision demande donc des modèles couplés plus évolués que ceux actuellement utilisés pour ce type de prévision. On peut néanmoins conjecturer que si la situation océanique avait été suivie régulièrement en même temps que la situation météorologique, en observant plus particulièrement la façon dont les anomalies de SST Atlantique se développaient au cours du printemps 2003, on aurait disposé d'un indicateur fort intéressant : il n'aurait certes pas permis, dans l'état actuel des connaissances et de développement des outils de prévision saisonnière, de prévoir la vague de chaleur dans toute son intensité, mais il aurait attiré l'attention sur le fait que l'on était, très probablement, dans une phase de genèse d'un phénomène pour le moins inhabituel et intense.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier David ANDERSON, Christophe CASSOU et Jean-Philippe PIEDELIEVRE pour leur avoir permis d'utiliser des résultats non publiés, P. BAHUREL et N. FERRY pour leur avoir fourni les anomalies de SST du printemps-été 2003, calculées à partir des analyses opérationnelles réalisées dans le cadre de MERCATOR-Océan, et L. TERRAY pour avoir signalé le travail de Rodwell *et al.* (2003).

Références

- André, J.C., Caneill, J.Y., Déqué, M., Rogel, Ph., Terray, L., et Tourre, Y., La prévision du climat: de l'échelle saisonnière à l'échelle décennale, Comptes-rendus Geoscience, **334**, 1115-1127, 2002.
- Déqué, M., Seasonal predictability of tropical rainfall : probabilistic formulation and validation, Tellus, **53A**, 500-512, 2001.
- Farrara, J. D., Mechoso, C.R., et Robertson, A.W., Ensembles of AGCM two-tier predictions and simulations of the circulation anomalies during winter 1997-98, Mon. Weather Rev., **128**, 3589-3604, 2000.
- Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., et Mestre, O., Les changements climatiques en France au XXième siècle, La Météorologie, **38**, 45-56, 2002.
- Rencher A.C., Methods of Multivariate Analysis, Second Edition, Wiley series in probability and statistics, 708pp., 2002.

Rodwell, M.J., Drévilion, M., Frankignoul, C., Hurrell J.W., Pohlmann, H., Stendel, M., et Sutton, R.T, North Atlantic forcing of climate and its uncertainty from a multi-model experiment, Journal Climate, to be submitted, 2003.