

Prix Prud'homme 2002

Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique

Résumé

Pendant les deux dernières décennies, la récurrence d'hivers doux et humides sur le nord du continent européen et la persistance de conditions de sécheresse sur le pourtour méditerranéen se sont accompagnées, en moyenne, d'un creusement de la dépression d'Islande et d'un gonflement de l'anticyclone des Açores. Ces faits s'expliquent par l'excitation privilégiée, à l'échelle quasi journalière, d'un régime atmosphérique proche de la phase positive de l'oscillation nord-atlantique. La prédominance de ce régime s'expliquerait en partie par l'action de l'océan Atlantique tropical nord sur l'atmosphère des moyennes latitudes et par l'accroissement d'origine anthropique de la concentration des gaz à effet de serre.

Christophe Cassou

Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs)
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex
cassou@cerfacs.fr

« Encore un après-midi avec ce vent de mer qui assèche tout... Maintenant, il y a toujours du vent », dit mon grand-père des Landes en inspectant ses pieds de tomates, d'aubergines et de piments. À la une du magazine *Time*, s'étalait récemment en gros caractères :

« *Wild weather: global warming is bringing deluge and thunderstorms in Europe. Scientists say, we'll have to get used to it* » (Un temps sauvage : le réchauffement du climat provoque des pluies diluviennes et des orages en Europe. D'après les scientifiques, nous devons

Abstract

From climate change to weather regimes: the North Atlantic Oscillation

Over the past two decades, the recurrence of mild and wet winters over the Northern European continent and the persistence of dry conditions around the Mediterranean Sea have been associated with the deepening of the Icelandic Low and the extension/reinforcement of the Azores High. Those facts can be interpreted, at quasi daily timescale, as the preferred excitation of a given atmospheric regime close to the positive phase of the North Atlantic Oscillation. The recent predominance of this regime can be explained partly by the impact of the North Tropical Atlantic Ocean upon the mid-latitude atmosphere and by the increase of greenhouse gas concentration induced by human activities.

Depuis une vingtaine d'années, on assiste en hiver à un radoucissement et à un renforcement des vents d'ouest et des précipitations sur le nord de l'Europe, en liaison avec l'apparition plus fréquente de la phase positive de l'oscillation nord-atlantique. Ici, le 12 janvier 2004, des vagues déferlent sur la jetée du port de Loméner (Morbihan) durant la tempête qui va traverser le nord de la France.
[© AFP, Marcel Mochet]



nous y habituer). Des étés plus chauds et plus secs, des printemps plus venteux, des hivers plus doux et plus humides ? Où, quand, pourquoi ?

Le climat actuel change ; c'est une certitude. Mais cette évidence est malmenée par la perception ou la mémoire plus ou moins objective du temps qu'il fait ou qu'il a fait, par la simplification et l'incohérence des messages véhiculés, par l'occurrence dans le passé d'épisodes climatiques anormaux qui s'apparentent parfois aux manifestations du ciel que nous subissons aujourd'hui. On trouve ainsi dans la circulaire n° 18 du ministère de l'Intérieur du 25 avril 1821 (Bainville et Ladoy, 1995) : « Depuis quelques années, nous sommes témoins de refroidissements sensibles dans l'atmosphère, de variations subites dans les saisons et d'ouragans ou d'inondations extraordinaires auxquels la France semble devenir de plus en plus sujette. »

La perception biaisée du changement climatique s'explique par le fait qu'il se manifeste à une multitude d'échelles de temps et d'espace. Certaines preuves sont facilement palpables, comme la fonte massive et générale des glaciers dans les régions tropicales. D'autres sont plus subtiles, comme la récurrence d'épisodes caniculaires ou de tempêtes qui ne vont pas changer le climat moyen de manière significative, mais

qui vont très sensiblement affecter les activités humaines et les équilibres écologiques. On parle alors de modification des « durées de retour » des événements extrêmes (lames d'eau exceptionnelles, vagues de chaleur...).

De manière classique, on considère deux origines possibles pour expliquer le réchauffement planétaire des dernières décennies et ses conséquences :

- Ce pourrait être une fluctuation naturelle (c'est-à-dire indépendante de l'activité humaine) à basse fréquence (c'est-à-dire avec une période allant de quelques années au siècle) du climat. Comme il est probable que l'atmosphère n'est pas capable, seule, de générer des oscillations à basse fréquence, l'ensemble du système climatique est pris en compte et on s'interroge sur le rôle de ses composantes lentes, en particulier l'océan qui en est la mémoire.

- Sinon, ce pourrait être la signature de la modification de la composition chimique de l'atmosphère induite par l'homme (rejets croissants de gaz à effet de serre, pollutions diverses, etc.). Les avis de la communauté scientifique évoluent vite sur ce deuxième point. Si, lors du deuxième rapport du Giec (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) en 1996, les climatologues suggéraient du bout des lèvres le rôle possible des activités humaines, ils énoncent clairement dans leur der-

nier volume, paru en 2001, qu'il existe « des preuves nouvelles et fortes sur le fait qu'une grande part du réchauffement observé est d'origine anthropique ».

Dans cet article, nous nous intéresserons aux deux origines possibles. Nous nous limiterons à la région Atlantique nord - Europe et à la saison d'hiver (mois de décembre, janvier et février), par souci de simplicité, mais aussi parce que les résultats y sont les plus marqués. Par la modélisation numérique, nous illustrerons un certain nombre de mécanismes de la circulation atmosphérique qui font intervenir les interactions océan-atmosphère à basse fréquence, alors que les taux de gaz à effet de serre restent fixes. Puis, nous analyserons brièvement la signature du forçage anthropique sur la circulation atmosphérique, pour certains scénarios d'émissions de gaz à effet de serre au XXI^e siècle.

L'oscillation nord-atlantique : de l'échelle décennale à l'échelle journalière

Les deux dernières décennies

Une manière simple de caractériser les changements climatiques de la fin du XX^e siècle est de comparer la circulation atmosphérique moyenne de la période 1980-1999 à celle des deux décennies précédentes (période 1960-1979). La différence des températures hivernales moyennes calculées sur ces deux périodes de vingt ans révèle un réchauffement sur le nord du continent européen, en particulier sur la Scandinavie et la Russie occidentale, ainsi que sur l'Amérique du Nord. Ce réchauffement contraste avec un refroidissement marqué sur les terres bordant la mer du Labrador et un refroidissement plus modéré sur l'Europe du Danube et le Sahara (fig. 1a). Ce quadripôle, de part et d'autre du bassin



En même temps, depuis une vingtaine d'années, les hivers sont plus secs sur l'Europe du Sud, là aussi en liaison avec l'apparition plus fréquente de la phase positive de l'oscillation nord-atlantique. Ici, le 25 février 1999, sécheresse et sol craquelé pour une partie du barrage Sant Antoni, à Lleida, au nord de l'Espagne. [© AFP, Laurent Ais]

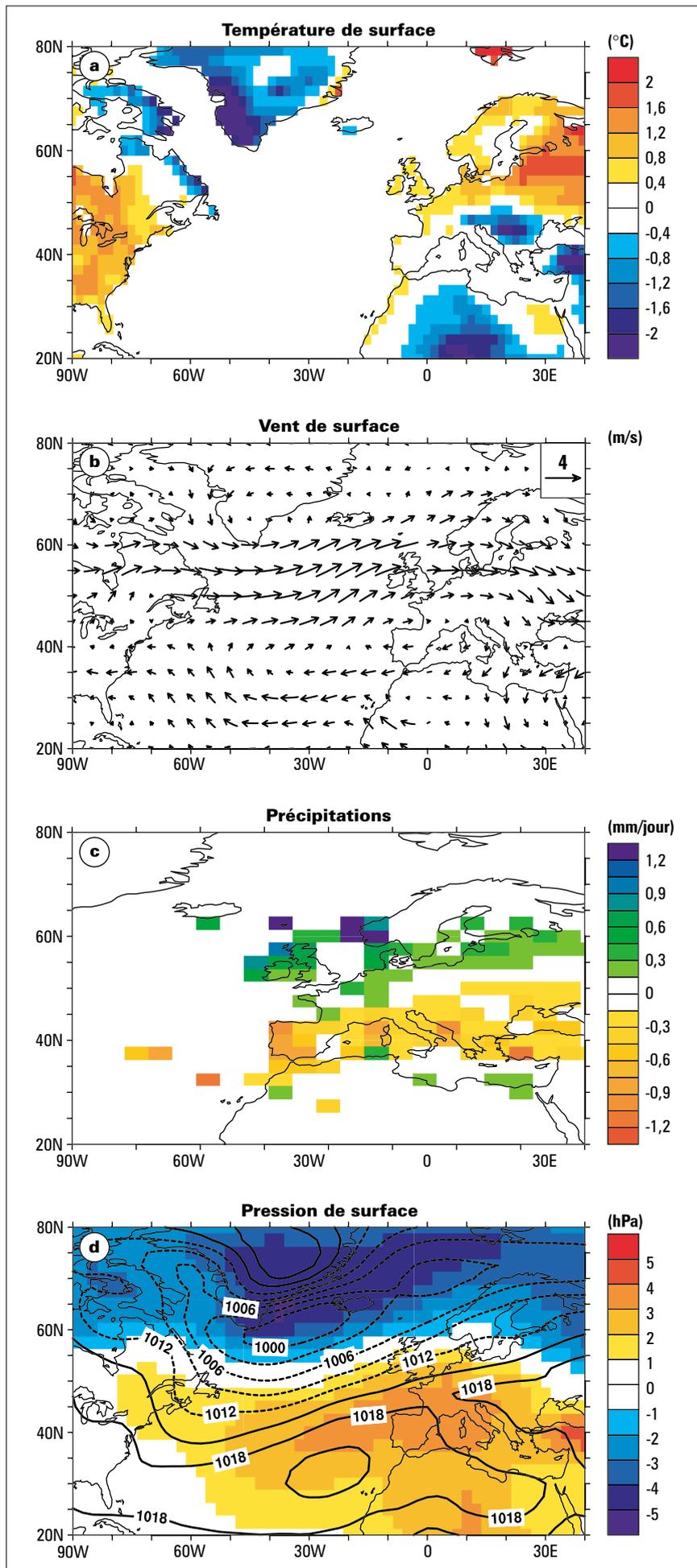


Figure 1 - Différence entre les moyennes atmosphériques sur vingt ans en hiver (mois de décembre à février) de la période 1980-1999 et de la période 1960-1979.
 a, différence pour la température de surface (°C) ;
 b, différence pour le vent au niveau 1 000 hPa (m/s) ;
 c, différence pour les précipitations (mm/jour) [d'après Hulme et New, 1997] ;
 d, champ moyen de pression de surface en hiver (hPa) [en contours] superposé à la différence des moyennes sur vingt ans des pressions de surface (hPa) [en couleurs].
 Les données proviennent des réanalyses NCEP [Kalnay et al., 1996], et cela pour l'ensemble des figures de cet article, sauf si autre précision.

nord-atlantique, est associé à un renforcement des vents d'ouest aux latitudes moyennes de l'Atlantique nord et à un renforcement des alizés sur le bassin tropical (fig. 1b).

L'Europe du Sud, plus sèche, contraste avec l'Europe du Nord, plus arrosée (fig. 1c). Depuis une vingtaine d'années environ, la Scandinavie, le Benelux et le nord des îles Britanniques subissent de plein fouet les dépressions hivernales avec leur lot de pluie et de vent violent, alors que l'Europe méditerranéenne, relativement protégée, souffre d'une sécheresse chronique. En moyenne, le « rail des tempêtes » s'est légèrement déplacé vers le nord, ce qui explique la structure nord-sud du changement des précipitations. Sur la France, Dreveton (2002) montre que la fréquence des fortes tempêtes n'a pas changé de manière significative, même si, en moyenne, les tempêtes toutes catégories confondues sont légèrement moins nombreuses sur l'Hexagone.

Définition de l'oscillation nord-atlantique

Quel est le chef d'orchestre de ce changement ? Ce changement semble être piloté par une redistribution de masse dans l'atmosphère entre les deux acteurs principaux des bulletins météo : l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Dans le jargon scientifique, il est lié à l'**oscillation nord-atlantique** (NAO pour North Atlantic Oscillation), qui quantifie les fluctuations de pression entre ces deux centres d'action (Hurrell, 2003). On parle de **phase positive** de l'oscillation nord-atlantique (NAO+) lorsque les deux centres d'action sont simultanément intensifiés et de **phase négative** (NAO-) lorsqu'ils sont simultanément affaiblis.

Les dernières décennies sont clairement dominées par une phase positive (fig. 1d) avec un renforcement et un décalage vers

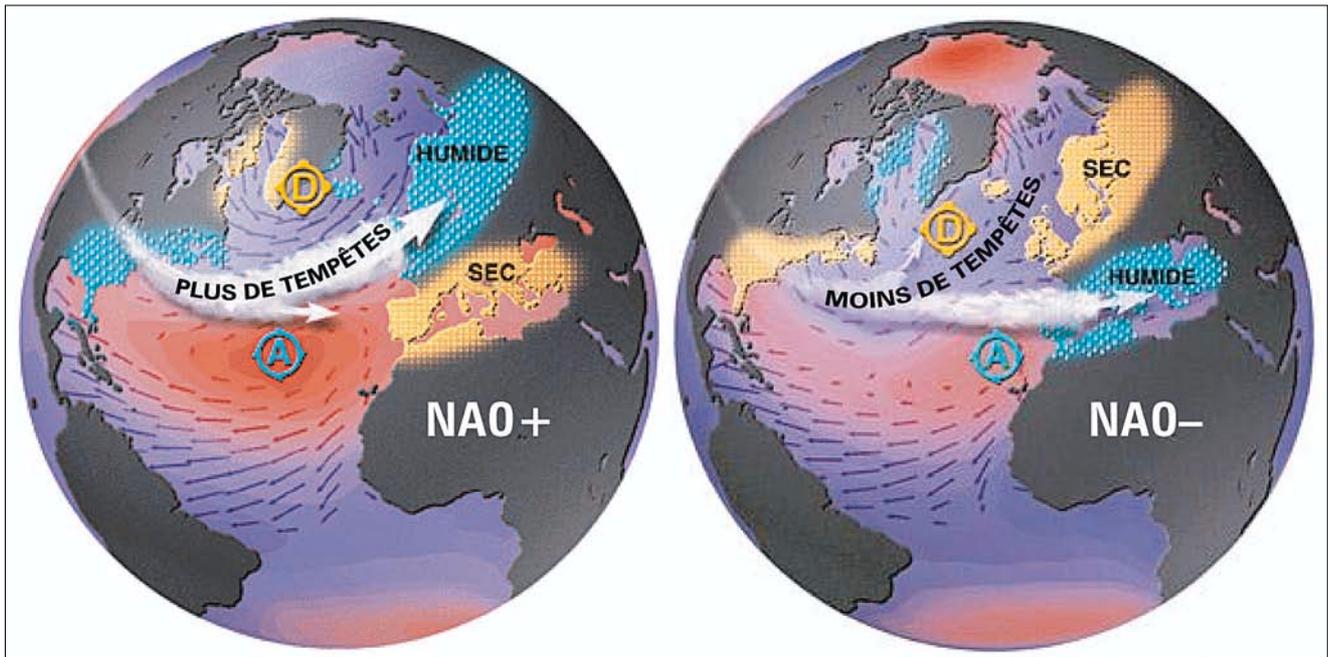


Figure 2 - Schéma récapitulatif des impacts associés aux deux phases de l'oscillation nord-atlantique (NAO). [Figure reproduite des pages descriptives Internet du Lamont-Doherty Earth Observatory, Martin Visbeck].

l'Europe de l'anticyclone des Açores et un creusement de la dépression d'Islande. L'intensification du gradient de pression entre les deux centres d'action (au sens climatologique) explique le renforcement des vents d'ouest par **géo-strophie**⁽¹⁾ (fig. 1b). Il en résulte une pénétration plus prononcée sur le continent européen des masses d'air océanique relativement chaud et humide, expliquant, en première approximation, la douceur hivernale des deux dernières décennies. À l'opposé, sur le Labrador et le Québec, les vents de nord-ouest apportent des masses d'air polaire froid et sec. La figure 2 résume schématiquement les impacts de la NAO pour ses deux phases.

L'indice NAO

Pour caractériser la phase de l'oscillation nord-atlantique, on construit traditionnellement un indice défini comme la différence de pression de surface entre les Açores (ou des régions proches, tels le Portugal ou Gibraltar) et l'Islande. On le calcule pour chaque hiver (voir encadré page suivante). Sur les 150 dernières années (fig. 3), la série d'indices calculés pour Lisbonne et Stykkisholmur met en évidence, à la fin

du xx^e siècle, l'alternance de périodes décennales qui privilégient les phases négatives dans les années 1950 à 1970, puis les phases positives ensuite, comme le suggéraient déjà les cartes précédentes. L'indice révèle aussi une forte **variabilité interannuelle** (c'est-à-dire d'un hiver à l'autre) avec de brusques changements, par exemple entre les hivers 1995 et 1996.

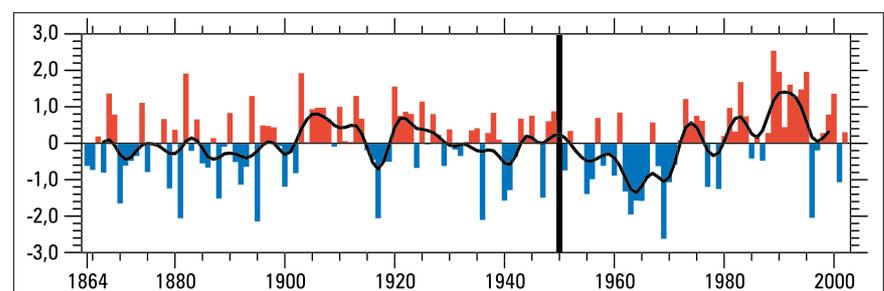
Doit-on comprendre le changement de circulation atmosphérique des vingt à trente dernières années (fig. 1) comme un glissement lent et progressif vers un nouvel état ? D'après l'indice NAO, il semblerait que non. L'oscillation nord-atlantique a toujours existé et est considérée comme un mode intrinsèque à l'atmosphère. Le changement climatique sur l'Europe doit être plutôt interprété comme la répétition depuis 1970 d'hivers à NAO+, dont la persistance explique l'effet décennal décrit précé-

demment. Le comportement de ces trente dernières années semble se rapprocher de celui du début du xx^e siècle, où une certaine persistance en phase positive était également décelable. En revanche, il en diffère par les fortes valeurs de l'indice : sept valeurs parmi les dix les plus élevées au cours des 150 dernières années ont été enregistrées depuis 1980.

Les régimes NAO

Quelle est l'échelle de temps caractéristique de l'oscillation nord-atlantique ? Nous avons suggéré que les moyennes sur de longues périodes (typiquement vingt ans comme au début de cette partie) masquent une variabilité à plus haute fréquence, c'est-à-dire plus rapide. Le changement de signe de l'indice NAO entre les hivers 1995 et 1996,

Figure 3 - Indice NAO moyenné sur les mois d'hiver (mois de décembre à février) et calculé pour les stations de Lisbonne (Portugal) et Stykkisholmur (Islande). L'indice est présenté pour les hivers 1864 à 2002 (année du mois de janvier par convention). La barre noire verticale matérialise le début des fluctuations quasi décennales à la fin du xx^e siècle. La courbe noire est une moyenne glissante de l'indice sur cinq ans.



(1) La géostrophie représente l'équilibre dynamique entre les forces de pression et la force de Coriolis (effet de la rotation terrestre). Dans l'hémisphère nord, le vent géostrophique est parallèle aux isohypses (lignes de niveau des surfaces isobares) et laisse les basses pressions sur sa gauche.

Le calcul de l'indice NAO

Si l'on consulte la littérature scientifique sur le calcul proprement dit de l'indice NAO, les références ne manquent pas. Dans les années 1920, le pionnier Sir Gilbert Walker incorporait les données de pression, de température de l'air et de précipitations de plusieurs stations météorologiques situées le long des côtes atlantiques. Aujourd'hui, l'indice NAO classique est calculé comme la différence de pression entre les Açores et l'Islande, selon la formulation de Rogers (1984). Il apparaît comme une simplification de l'indice original, dont il garde cependant la signification première : décrire et quantifier simplement la « force des vents d'ouest » sur le bassin Atlantique nord.

Des calculs annexes ont été introduits depuis pour affiner l'indice. Ainsi, l'indice NAO peut être obtenu en décomposant les fluctuations du champ de pression de surface ou de géopotential en composantes principales ou en modes de variabilité. Il peut aussi être déduit d'une étude en régimes. Il peut encore être calculé en considérant les déplacements géographiques de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande. D'autres techniques tiennent compte de la structure tridimensionnelle de la NAO.

Restons simples et attachons-nous à la manière dont on obtient l'indice NAO classique. Considérons les relevés de pression journaliers d'une station météorologique proche de l'anticyclone des Açores (ce peut être Lisbonne, Ponta Delgada, Gibraltar, etc.) et d'une station proche de la dépression d'Islande (Reykjavik, Stykkisholmur, Akureyri, etc.). Le choix des stations dépend notamment de la période sur laquelle on veut calculer l'indice et de la qualité des mesures pour une période donnée, sachant que toutes les observations font l'objet de traitements statistiques préalables pour éliminer les signaux artificiels (changements d'instruments, modification de la fréquence des observations...).

Soit $A_{m,y}$ et $D_{m,y}$ les moyennes mensuelles de ces relevés journaliers, où m est le mois ($m = 1$ à 12) et y l'année ($y = y_1$ à y_2). La moyenne et l'écart type sont calculés pour chaque mois, pour A et D séparément et sur une période de référence (on choisit classiquement des durées de trente ans telles que 1961-1990 ou 1971-2000) :

$$\bar{A}_m = \frac{1}{y_2 - y_1 + 1} \sum_{y_1}^{y_2} A_{m,y} \quad \text{et} \quad \sigma_m = \sqrt{\frac{1}{y_2 - y_1} \sum (A_{m,y} - \bar{A}_m)^2}$$

Chaque donnée mensuelle est ensuite normalisée en soustrayant la moyenne du mois correspondant et en divisant par son écart type :

$$A'_{m,y} = \frac{A_{m,y} - \bar{A}_m}{\sigma_m}$$

On fait le même exercice pour $D_{m,y}$ et l'indice NAO pour un mois m et une année y donnés est défini par :

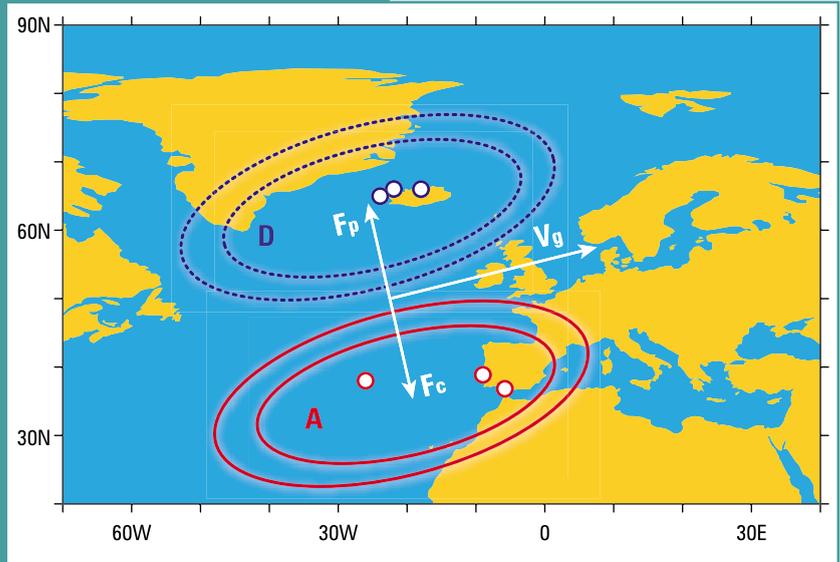
$$NAO_{m,y} = A'_{m,y} - D'_{m,y}$$

L'étape de normalisation est nécessaire dans la mesure où la dépression d'Islande est beaucoup plus fluctuante en intensité que l'anticyclone des Açores ; on biaiserait les résultats si on considérait les valeurs brutes. Le lecteur est invité à consulter les pages Internet [www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.html] pour plus de renseignements, mais également pour l'obtention des données.

Dans le cas de notre article, l'indice NAO d'hiver NAO_{hiv} représente la simple moyenne des mois de décembre, janvier et février ; on obtient ainsi une série temporelle avec une valeur par an :

$$NAO_{hiv,y} = \frac{1}{3} (NAO_{dec,y-1} + NAO_{jan,y} + NAO_{lev,y})$$

Notons qu'il n'est pas nécessaire de calculer les moyennes saisonnières sur les données originales de pression et d'appliquer le formalisme précédent pour obtenir l'indice NAO sur une saison. Cela signifie, en particulier, que l'indice saisonnier n'a pas un écart type égal à 1.



Représentation schématique de la circulation géostrophique associée à la NAO. Fp désigne la force de pression, Fc la force de Coriolis et Vg le vent géostrophique parallèle aux lignes isohypses (hausse de la pression en trait plein rouge, chute de la pression en trait pointillé bleu). Les sites classiques pour le calcul de l'indice NAO sont repérés par des points de couleur (rouge pour les Açores, bleu pour l'Islande).

deux années dans une décennie dominée par les NAO+, en est un bon exemple. La structure spatiale de la différence de pression entre ces deux hivers (fig. 4a) est très proche de la structure décennale de la figure 1, et de même pour ses impacts (fig. 4b et 4c) : on retrouve le quadripôle de température et le balancier entre l'Europe du Nord et l'Europe méditerranéenne pour les pluies.

Séparons l'hiver en mois indépendants et choisissons l'hiver 1989-1990, dont la valeur de l'indice NAO est proche de +2. Si l'on reproduit maintenant l'exercice de différence de pression entre les mois de janvier 1990 et de décembre 1989, on retrouve de nouveau une structure NAO très claire (fig. 5). Il semblerait donc que les moyennes sur une saison masquent également une variabilité de type NAO à encore plus haute fréquence, dite **variabilité intrasaisonnière**.

Allons jusqu'au bout et considérons maintenant l'échelle journalière. Les cartes quotidiennes de pression sont « projetées sur la structure NAO+ canonicque », afin de quantifier la ressemblance spatiale des anomalies journalières avec l'oscillation nord-atlantique. On obtient ainsi un « indice de ressemblance » pour chaque jour. Plus cet indice est fort (resp. faible), plus la circulation atmosphérique du jour ressemble à (resp. s'éloigne de) la phase positive de la NAO. L'hiver

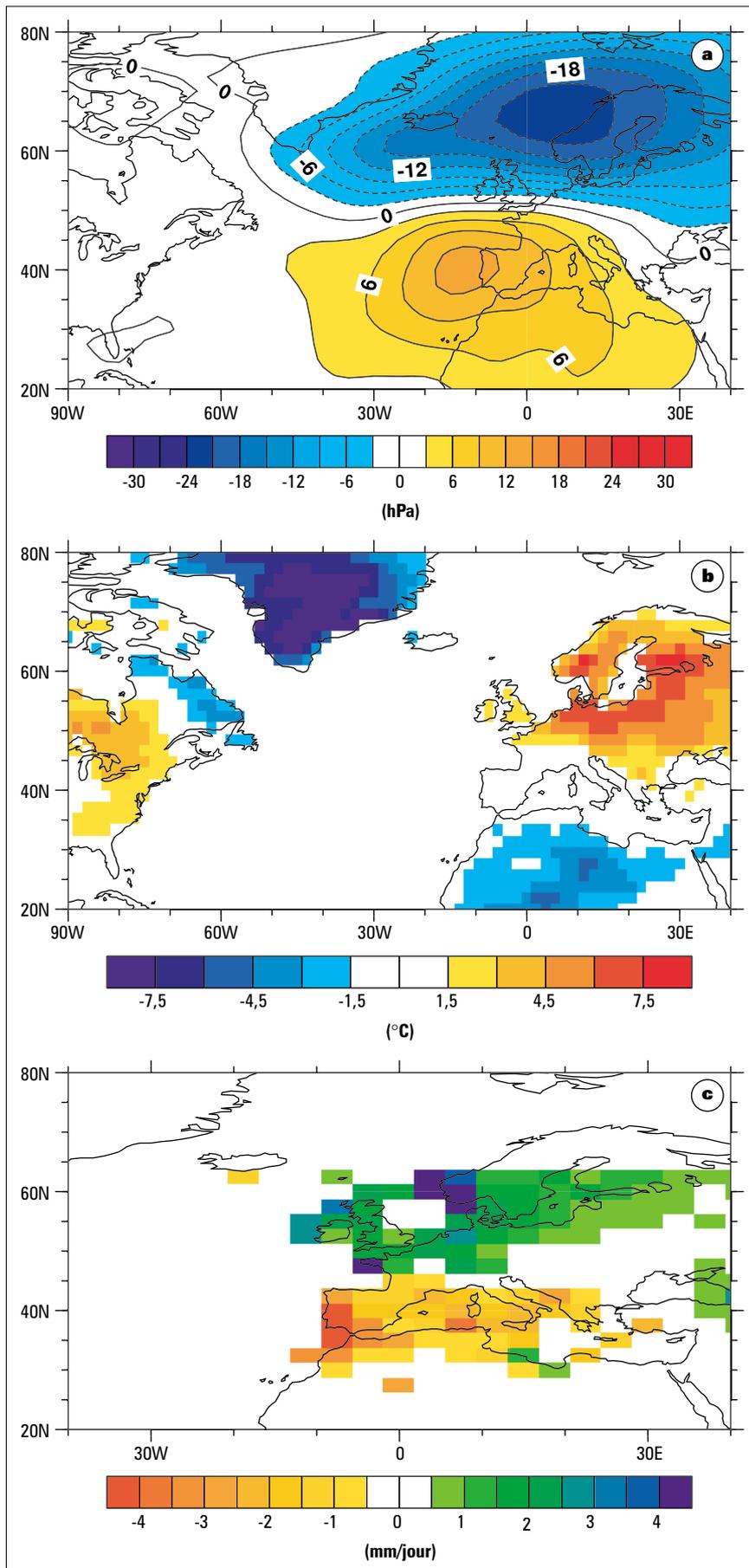


Figure 4 - Différence entre les moyennes atmosphériques d'hiver (mois de décembre à février) de l'année 1995 et de l'année 1996.

a, différence pour la pression de surface (hPa) ;
 b, différence pour la température de surface (°C) ;
 c, différence pour les précipitations (mm/jour) (d'après Hulme et New, 1997).

considéré est toujours l'hiver 1989-1990 (fig. 6). Au mois de décembre, une structure journalière proche de la NAO-persiste, ce qui contraste avec les deux mois suivants dominés par des structures de type NAO+. Janvier et février se distinguent en fait par l'existence de « paquets de jours » de type NAO+, appelés **régimes de temps** ou, plus simplement, **régimes** (D'Andrea, 2003).

Leur origine est complexe. Ils se caractérisent par une grande cohérence géographique (par exemple, toute la zone Atlantique nord - Europe), fixée en grande partie par la position des continents, et par des durées de vie de l'ordre de dix à quinze jours. L'oscillation nord-atlantique, par ses deux phases, représente typiquement deux régimes pour l'Atlantique nord (fig. 7a et 7b).

Du journalier au décennal

Le concept de régime donne une perception plus juste du climat des latitudes moyennes et de son évolution. Le régime est, en fait, la principale entité physique des fluctuations atmosphériques aux moyennes latitudes. Les changements du temps qu'il fait peuvent se comprendre comme le passage d'un régime à un autre. La variabilité climatique peut s'interpréter, quant à elle, comme la conséquence sur une longue période de transitions privilégiées vers un régime donné. Ainsi, c'est parce que le régime NAO+ est préférentiellement excité en janvier 1990 que ce mois est particulièrement doux et humide sur la France, en contraste avec le mois de décembre 1989 où le régime NAO+ est presque absent. C'est parce que, sur les trois mois de l'hiver 1989-1990, les régimes NAO+ dominent que les températures sont plutôt douces, par rapport à l'hiver 1986-1987, par exemple. C'est parce que les régimes NAO+ sont récurrents sur les vingt à trente derniers hivers que la période 1980-1999 se différencie de la période 1960-1979, comme nous l'avons décrit au début de cet article (fig. 1).

La remontée progressive dans les échelles de temps que nous venons d'accomplir fournit une vision « nouvelle » des changements climatiques. Ils sont souvent décrits par des valeurs statistiques moyennes alors que, dans notre cas, ils s'expliquent par un changement à l'échelle journalière de l'occurrence de certains régimes. Ils sont considérés comme une intégration dans le temps des transitions préférentielles de l'atmosphère vers un régime particulier.

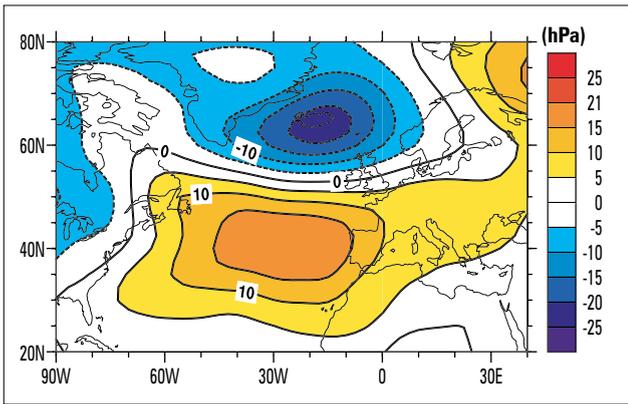


Figure 5 - Différence entre les moyennes de pression de surface du mois de janvier 1990 et du mois de décembre 1989 (hPa).

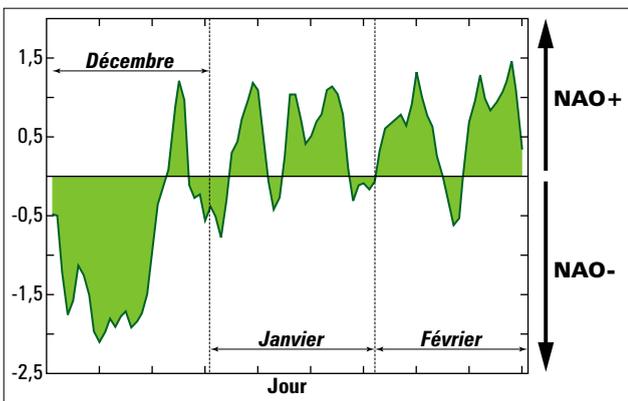


Figure 6 - Projection des moyennes journalières de pression de surface du 1^{er} décembre 1989 au 28 février 1990 sur la structure NAO+ canonique.

Sur la zone Atlantique nord - Europe, les régimes NAO sont dominants et représentent environ la moitié des situations d'hiver. Deux autres régimes existent dans cette zone : le régime de **dorsale atlantique**, caractérisé par un gonflement de l'anticyclone des Açores recouvrant tout le bassin atlantique (fig. 7c), et le régime de blocage, caractérisé par un anticyclone persistant sur le nord de l'Europe et la Scandinavie (fig. 7d). Le **blocage** est souvent responsable de vagues de froid en canalisant des coulées d'air sibérien sec et glacial vers l'Europe du centre et de l'Ouest (Walsh et al., 2001).

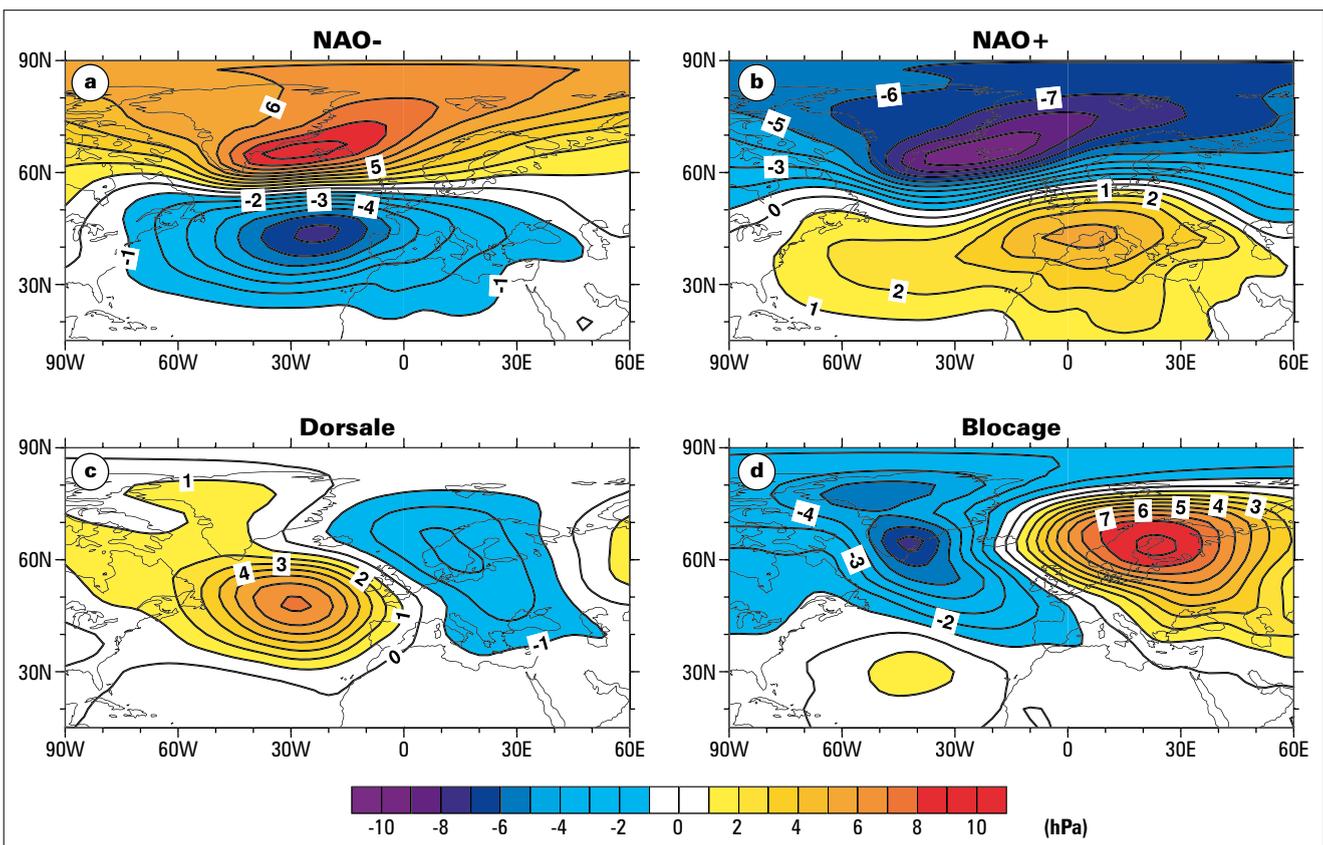
L'approche en régimes nous permet de lever un paradoxe. Ce n'est pas parce que la tendance de la décennie est plutôt à des hivers doux et humides (prédominance des NAO+) qu'une vague de froid de très grande ampleur ne pourrait pas frapper l'Europe, correspondant à l'excitation sur quelques jours du régime de blocage. L'année 2003 en est un bel exemple avec un épisode neigeux court, mais intense sur le nord de la France en janvier, alors que l'hiver 2002-2003 restera plutôt considéré comme clément dans les annales climatiques.

La question que l'on se pose maintenant est de savoir pourquoi et comment le régime NAO+ est favorisé au détriment des autres pendant les dernières décennies.

L'interaction océan-atmosphère et l'importance des tropiques

L'atmosphère des moyennes et hautes latitudes a un comportement chaotique sur des échelles de temps courtes (jusqu'au mois environ) et, sans

Figure 7 - Anomalies de pression de surface (hPa) pour les quatre régimes climatiques caractéristiques de la région Atlantique nord - Europe. Ces régimes sont obtenus par des techniques de classification appliquées aux mois d'hiver sur la période 1950-2001. a, régime NAO- ; b, régime NAO+ ; c, régime de dorsale ; d, régime de blocage.



intervention « extérieure », elle passerait quasi aléatoirement d'un régime à un autre. Le fait que quelques régimes soient plus récurrents certains hivers laisse envisager l'existence d'un forçage plus lent que l'atmosphère, qui va modifier les transitions entre les régimes et, in fine, en privilégier ou en défavoriser certains. De par son inertie thermique, l'océan est le principal candidat pour ce forçage. Il faut cependant garder à l'esprit que le forçage extérieur n'est qu'une modulation de l'activité atmosphérique, majoritairement chaotique.

Les régimes et l'océan

Les quatre régimes sont liés à des anomalies de température de surface de la mer (ou SST pour Sea Surface Temperature) en hiver :

- Des SST froides au large de Terre-Neuve et chaudes en mer de Norvège sont présentes lorsque le régime de blocage est préférentiellement excité (Namias, 1964).
- Le régime de dorsale est plutôt lié à des événements **La Niña** dans le Pacifique (Cassou et Terray, 2001). Ceux-ci se réfèrent à la phase froide de l'**oscillation australe** – ou **Enso** pour El Niño Southern Oscillation – (Neelin et al., 1998) et se caractérisent par un renforcement de la langue d'eau froide équatoriale sur le bassin pacifique. L'Enso est connu pour être le phénomène climatique ayant le plus d'influence à l'échelle planétaire. Il est intéressant de souligner ici que l'approche en régimes extrait une connexion vers l'Atlantique nord pour la phase froide de l'Enso, mais pas pour la phase chaude (ou **El Niño**) qui est pourtant bien plus populaire et médiatisée...
- Les régimes NAO, quant à eux, sont liés à des anomalies de SST dans l'Atlantique nord (Deser et Blackmon, 1993). En première approximation, les anomalies océaniques sont opposées entre les deux phases. Si l'on corrèle ou régresse l'indice NAO (fig. 3) avec les SST de l'Atlantique nord, on obtient une structure zonale à trois étages des subtropiques au bassin arctique (fig. 8).

Le fait que des anomalies de température de surface de la mer existent de façon concomitante avec les régimes ne renseigne pas forcément sur la nature exacte de l'interaction océan-atmosphère. En effet, les anomalies de SST que nous venons de décrire sont cohérentes avec les circulations atmosphériques de surface, qui auraient plutôt tendance à les créer, et non à les subir, en particulier pour les

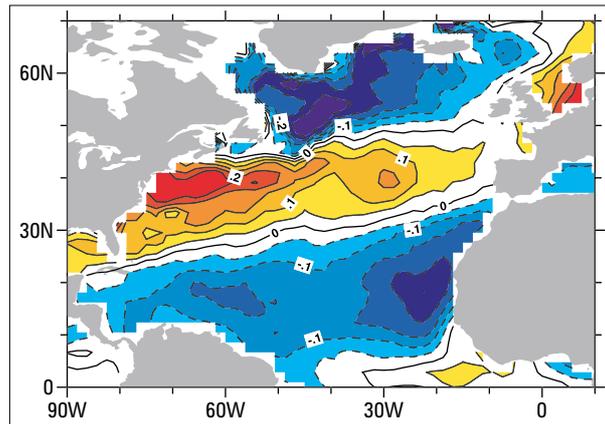


Figure 8 - Régression (°C) entre l'indice NAO d'hiver et la température de surface de la mer d'hiver de la période 1950-2001. Elle matérialise les relations moyennes entre l'indice NAO et l'état océanique. Typiquement, lorsque l'indice NAO est égal à +1, la température de surface de la mer est plus froide de l'ordre de -0,1 à -0,2 °C dans les tropiques, plus froide de -0,3 °C au sud du Groenland et plus chaude de 0,1 à 0,3 °C dans une bande intermédiaire située autour de 35° N.

régimes NAO et le régime de blocage (Cayan, 1992). Par exemple, en conditions NAO+, l'océan Atlantique se refroidit dans le bassin nord et le bassin subtropical (fig. 8). Cela est cohérent, d'une part avec le renforcement des vents d'ouest qui tend à refroidir l'océan nord par augmentation de l'évaporation de surface, d'autre part avec l'intensification des alizés (due au renforcement de l'anticyclone des Açores) qui refroidit l'océan tropical.

Pour savoir si ces anomalies tripolaires sont une réponse à la circulation atmosphérique ou bien si elles peuvent modifier l'occurrence même des régimes, ou bien les deux à la fois, nous avons recours à la modélisation numérique.

L'importance des tropiques

Le modèle numérique que nous utilisons est le modèle de circulation générale atmosphérique Arpège, développé conjointement à Météo-France et au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Deux types d'expériences numériques sont réalisés :

- une simulation dite de contrôle, dans laquelle l'état moyen des températures de surface de la mer est imposé dans le modèle ;
- des simulations dites perturbées, dans lesquelles on prescrit des anomalies de SST afin d'extraire leur forçage sur l'atmosphère par comparaison avec la simulation de contrôle.

L'action du tripôle océanique de l'Atlantique nord lié aux régimes NAO est étudiée en se focalisant sur sa partie tropicale. Deux simulations sont effectuées,

l'une dans laquelle on impose des anomalies chaudes de l'ordre de +0,8 °C dans le bassin subtropical (fig. 9a), l'autre dans laquelle on impose ces mêmes anomalies, mais avec un signe opposé (anomalies froides).

L'impact des anomalies de SST sur l'atmosphère de la région Atlantique nord - Europe est quantifié en termes d'occurrence des régimes NAO simulés par le modèle. La figure 9b montre que les régimes NAO+ sont favorisés lorsque l'Atlantique tropical nord est froid

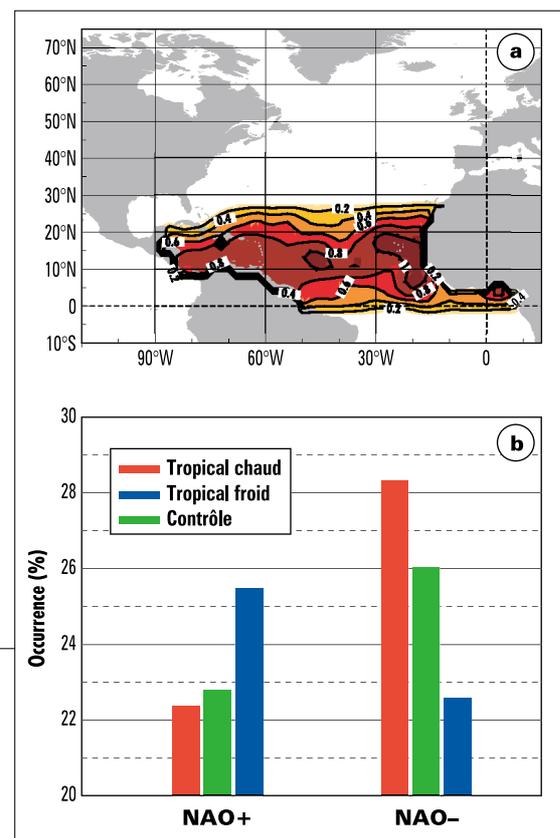


Figure 9 - a, anomalie de température de surface de la mer prescrite dans le modèle atmosphérique Arpège (°C) ; b, occurrence des régimes NAO+ et NAO- en fonction du signe de l'anomalie prescrite et comparaison à une simulation de contrôle.

(25,5 % des jours d'hiver contre 22,8 % pour le contrôle). L'inverse apparaît clairement pour le régime NAO-, qui est préférentiellement excité lorsque l'Atlantique tropical est chaud (28,3 %) et beaucoup moins présent quand il est froid (22,6 %). Ces résultats de modèle suggèrent que, bien que les régimes NAO tendent à imprimer des anomalies de SST tropicales via les vents de surface, celles-ci tendent aussi à modifier leur excitation. C'est une action main dans la main ou encore une sorte de couplage à distance.

Ces analyses soulignent l'importance des connexions tropiques - latitudes tempérées et mettent en évidence la nature planétaire du climat. Pour comprendre la variabilité climatique aux moyennes latitudes, pour comprendre le « temps qu'il fait », contrôlé par le type de régimes, il faut regarder un peu plus loin que l'Europe et ses alentours et avoir conscience que ce qui se passe aux antipodes peut affecter le ciel de nos contrées. Si l'on reproduit le même exercice en prescrivant dans le modèle, cette fois, uniquement les étages de moyenne et haute latitude du tripôle de SST (c'est-à-dire au nord de 30° N), les résultats sont moins clairs et tendent même à confirmer que les anomalies océaniques extratropicales sont plutôt des réponses à la circulation de surface des régimes atmosphériques.

Les mécanismes de connexion tropiques - latitudes moyennes

Quels sont les mécanismes qui interviennent dans l'influence tropicale sur la région Atlantique nord - Europe ? Ils sont schématiquement résumés sur la figure 10 pour le cas des anomalies chaudes de température de surface de la mer. Leur impact est important sur la convection au-dessus du continent sud-américain et se traduit dans le modèle par un renforcement des pluies sur pratiquement tout le bassin amazonien et, par là-même, par une intensification de la divergence en haute troposphère (fig. 10a et 10b). Cette anomalie est pilotée par une convergence d'humidité de basses couches accrue vers le continent sud-américain, l'humidité étant transportée par les alizés moyens depuis l'océan plus chaud. L'augmentation de la convection équatoriale est compensée par une subsidence (mouvement descendant de l'air) plus importante dans les subtropiques (entre 10° N et 30° N) et sur les Caraïbes, ce qui suggère un renforcement de la cellule de circulation méridienne tropicale ou cellule de Hadley locale atlantique.

La connexion vers les plus hautes latitudes s'établit ensuite via le courant-jet, tube de vents d'ouest très forts situé vers 9 à 11 kilomètres d'altitude (fig. 10a et 10b). Le courant-jet a son origine dans le transport de chaleur des tropiques vers le pôle et dans la rotation de la Terre. Il

est le cœur de la dynamique atmosphérique aux moyennes latitudes. Un renforcement de la cellule de Hadley s'accompagne d'un renforcement du courant-jet, qui va se déplacer légèrement vers le sud, mais surtout prendre une extension plus zonale. C'est cette position qui va privilégier en bout de course l'affaiblissement de l'anticyclone des Açores et, plus au nord, en balancier, le comblement de la dépression d'Islande (Terray et Cassou, 2002). Les régimes NAO- sont ainsi favorisés et les anomalies de vent de surface associées vont imprimer des anomalies océaniques et recréer la structure tripolaire. La modification du rail des tempêtes associée à cette situation va contribuer à amplifier ou à maintenir cet état anormal.

Nous avons montré que les anomalies océaniques, en particulier tropicales, ont un impact sur la dynamique atmosphérique dans la région Atlantique nord - Europe. Elles affectent l'occurrence des régimes NAO. Dans la mesure où les constantes de temps océaniques sont beaucoup plus grandes que celles de l'atmosphère, les anomalies océaniques persistantes peuvent être en partie responsables de fluctuations à basse fréquence de l'atmosphère. La tendance observée des SST sur le bassin atlantique tropical va plutôt vers un refroidissement, ce qui pourrait donc participer à la tendance observée pour l'atmosphère vers les NAO+ (fig. 3). Cependant, il semblerait que cette tendance des SST ne puisse pas expliquer l'intensité des phases NAO+ de la période 1980-1999, ni même leur forte persistance d'une

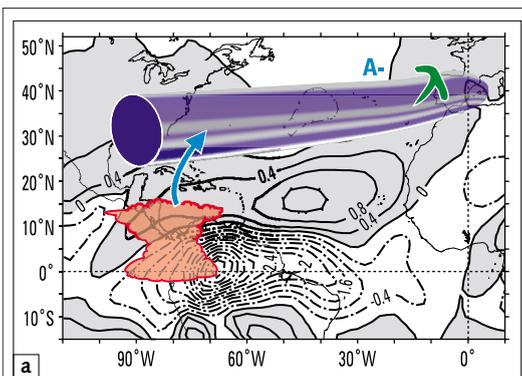
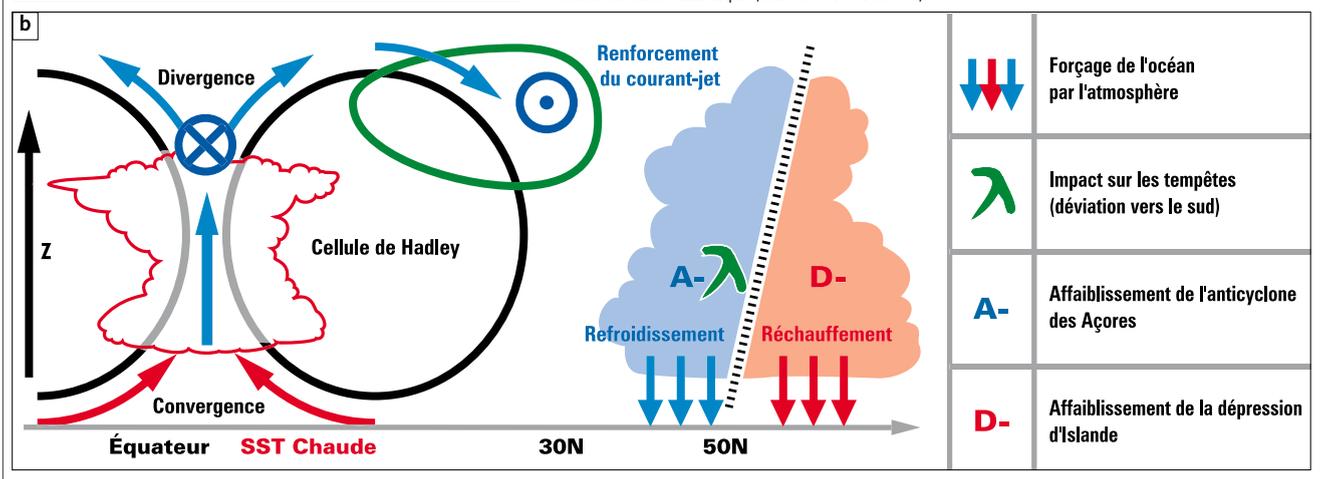


Figure 10 -
 a, anomalie de divergence et de convergence en haute troposphère calculée à 200 hPa dans le modèle Arpège par différence entre la simulation perturbée avec des SST tropicales chaudes et celle avec des SST tropicales froides. Les valeurs négatives indiquent par convention une augmentation de la divergence (10^6 s^{-1}). Le courant-jet est matérialisé par un tube bleu et l'augmentation de la convection par le nuage rouge.
 b, schéma récapitulatif des connexions tropiques-latitudes moyennes selon une coupe sud-nord sur l'ouest du bassin atlantique (entre 90° W et 30° W).



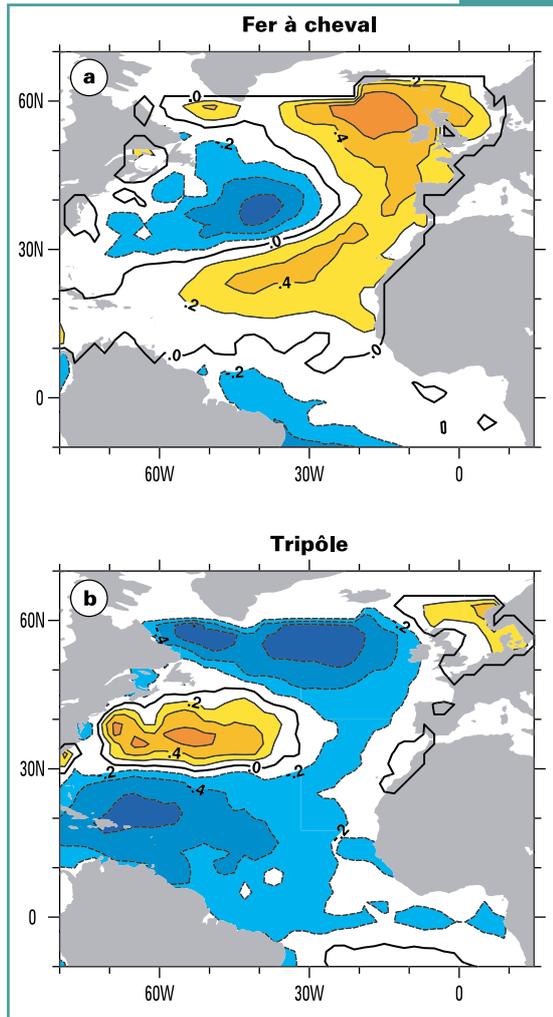


Figure 11 -
 a, anomalies de SST (°C) moyennées pour les fins d'été (mois de juillet, août et septembre) précédant les hivers de la période 1949-2003 dominés par les régimes NAO-.
 b, anomalies de SST (°C) moyennées pour les fins d'été (mois de juillet, août et septembre) précédant les hivers de la période 1949-2003 dominés par les régimes NAO+.

Perspective de prévision saisonnière de la NAO d'hiver

L'essentiel de cet article est consacré aux relations « simultanées » entre l'oscillation nord-atlantique d'hiver et les températures de surface de l'Atlantique en hiver. Il existe aussi des relations « déphasées » entre les anomalies de SST de la fin de l'été sur l'Atlantique et les phases de la NAO de l'hiver suivant. Ces anomalies océaniques peuvent donc être considérées comme des précurseurs pour l'apparition des régimes NAO. On présente ici un exercice de prévision simple construit dans ce cadre.

Une structure océanique de fin d'été est extraite pour le régime NAO- en sélectionnant dans l'historique observé les hivers dominés par le régime NAO- (le critère de sélection est d'avoir au minimum deux mois sur les trois mois d'hiver occupés par le régime NAO-) et en moyennant les anomalies océaniques des fins d'été précédentes correspondantes (mois de juillet, août et septembre). On répète l'exercice pour le régime NAO+.

- La structure océanique associée au régime NAO- est dite « en fer à cheval » et se caractérise par un noyau froid au sud-est de Terre-Neuve ceinturé par des SST plus chaudes dans les subtropiques et l'est du bassin atlantique (fig. 11a) [Czaja et Frankignoul, 1999].

- La structure océanique associée au régime NAO+ se caractérise par une sorte de « tripôle » en latitude, avec des anomalies froides au sud du Groenland et dans le bassin subtropical ouest et des anomalies chaudes le long du Gulf Stream (fig. 11b).

Les mécanismes physiques qui expliquent cette relation déphasée sont complexes et sont détaillés dans Cassou et al. (2004).

L'exercice de prévision saisonnière repose sur l'hypothèse que, plus les anomalies de SST de la fin de l'été sont proches de la structure en fer à cheval (resp. en tripôle), plus les chances sont grandes que l'hiver suivant soit dominé par les régimes NAO- (resp. NAO+). La ressemblance des anomalies de la fin de l'été est déterminée par leurs projections spatiales sur les deux structures des figures 11a et 11b, projections que l'on reporte dans l'espace réduit représenté par la figure 12.

Prenons la prévision de l'hiver 1989 comme exemple (flèche bleue). Les anomalies de SST observées pour la fin de l'été 1988 sont projetées sur la structure en fer à cheval (resp. en tripôle) et la valeur de cette projection est indiquée par l'abscisse (resp. l'ordonnée) du rond 89 de la figure 12.

Plus la projection est positive (resp. négative), plus la structure observée à la fin de l'été est proche (resp. proche de l'inverse) du précurseur. Dans le cas 1989, il apparaît que les anomalies d'été se rapprochent très fortement du mode tripôle (+1,8) et se rapprochent en même temps de l'inverse du mode fer à cheval (-1,8). On prévoit ainsi dès la fin de l'été qu'il est probable que l'hiver 1989 soit dominé par les régimes NAO+. De manière plus générale, si le rond tombe dans l'espace blanc (resp. gris), une phase positive (resp. négative) de la NAO est prévue. De plus, en première approximation, plus le rond s'écarte de la ligne de séparation entre le blanc et le gris, plus la NAO de l'hiver suivant sera intense.

On répète cet exercice pour chaque hiver de la période 1949-2003. La vérification à posteriori de la prévision est indiquée ici par le code couleur des ronds. Les ronds bleus correspondent aux hivers dominés par les régimes NAO+ (deux mois sur trois pour les bleu clair, trois sur trois pour les bleu sombre), les ronds jaunes et orange aux hivers dominés par les régimes NAO- (deux mois sur trois pour les jaunes, trois sur trois pour les orange). Les ronds blancs représentent les hivers où les régimes NAO ne sont pas prédominants. L'exercice est prometteur, puisque le signe de la NAO est prévu avec succès dans 22 cas sur les 26 hivers dominés par les régimes NAO. Schématiquement, une prévision est bonne si les ronds bleus (resp. jaunes-orange) se situent dans l'espace blanc (resp. gris). Des mauvaises prévisions existent pour les hivers 1975 et 1983, où une NAO négative est faussement prévue, et les années 1985 et 1986, où une NAO positive est faussement prévue.

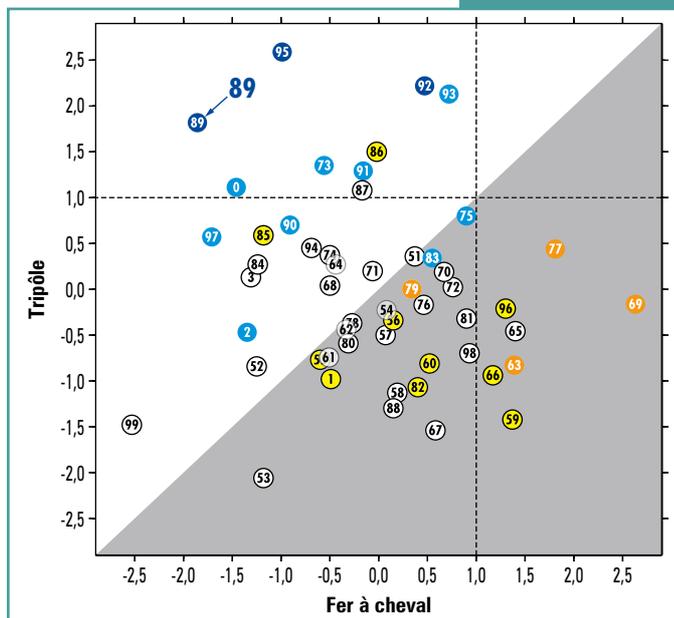


Figure 12 - Projection des anomalies de fin d'été de chaque année de la période 1949-2003 sur les deux modes des figures 11a et 11b (voir texte). Le chiffre dans les ronds est l'année de l'hiver (année du mois de janvier par convention).

année à l'autre (Gillett et al., 2003a). Un autre facteur apparaîtrait nécessaire. Serait-ce le forçage anthropique ?

Forçage anthropique et occurrence des régimes NAO

Afin de quantifier l'impact sur l'atmosphère de la croissance de la concentration des gaz à effet de serre due à l'activité humaine, un nouveau jeu de simulations est analysé (Démory, 2003) :

- La simulation de contrôle, ou du « climat actuel », est maintenant une expérience où l'on force le modèle par les températures de surface de la mer et les concentrations de gaz à effet de serre observées sur la période 1960-1999.
- Les expériences perturbées sont celles où l'on impose les concentrations de gaz à effet de serre selon plusieurs scénarios du Giec pour la fin du XXI^e siècle et où l'on prescrit les températures de surface de la mer estimées pour cette période. Ces dernières sont obtenues à l'aide d'une simulation couplée océan-atmosphère-végétation-glace du climat dans laquelle on change les concentrations de gaz à effet de serre.

De nouveau, nous comparons la simulation perturbée avec la simulation de contrôle en termes d'occurrence des régimes NAO. Afin de s'assurer de la robustesse des résultats, plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été testés : un scénario pessimiste (A2) dans lequel les concentrations de gaz à effet de serre croissent fortement et un scénario plus modéré (B2) dans lequel on fait l'hypothèse que certaines mesures de restriction des émissions de gaz à effet de serre sont prises.

La figure 13 est sans appel. Quelle que soit l'expérience perturbée, le modèle montre une occurrence très nettement privilégiée des régimes NAO+, au détriment des régimes NAO-. Le changement par rapport au climat actuel est tel que la fréquence d'apparition des phases positives de la NAO est au minimum doublée. Il est d'autant plus fort que le scénario d'émissions est pessimiste. Ce bouleversement drastique de l'équilibre dynamique de l'atmosphère sur la région Atlantique nord - Europe pourrait avoir des conséquences économiques, sociales et culturelles très importantes. Nos résultats sont en accord avec ceux de Gillett et al. (2003b), qui détectent, pour la pre-

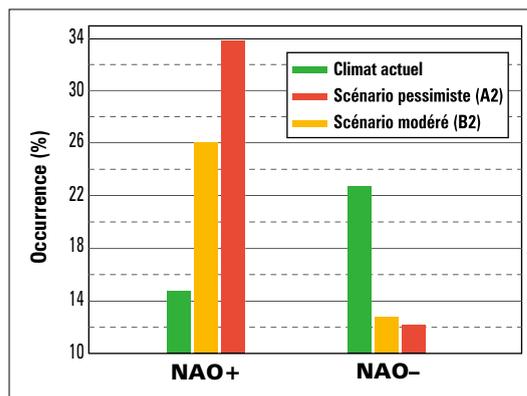


Figure 13 - Occurrence simulée des régimes NAO+ et NAO- à la fin du XXI^e siècle pour les scénarios d'émission A2 et B2 et comparaison avec le climat actuel.

mière fois, une signature du forçage anthropique sur des variables dynamiques, c'est-à-dire autres que la température : ils montrent que les fortes valeurs de NAO positives observées depuis environ vingt ans peuvent être attribuées pour une grande part aux activités humaines.

Bilan

Que devons-nous retenir ? Les changements climatiques observés depuis les années 1980 s'expliquent par la répétition du régime NAO+, qui est préférentiellement excité. Ce sont les caractéristiques quotidiennes de ce régime, en termes de température, de précipitations et de tempêtes, qui expliquent pour les dernières décennies le réchauffement important observé de l'Europe à l'Asie, les tempêtes plus fortes sur l'Atlantique nord et les sécheresses (resp. les pluies) sur l'Europe du Sud (resp. du Nord). Un nouvel état climatique n'est pas apparu, mais un état préexistant se trouve privilégié.

Dans mes travaux de thèse, j'ai mis en évidence, par la modélisation numérique, le rôle de l'océan sur l'occurrence des régimes NAO, en particulier le rôle du bassin atlantique tropical. Des anomalies de température de surface de la mer froides (resp. chaudes) favorisent l'excitation des phases positives (resp. négatives) de la NAO. Le mécanisme de connexion entre les tropiques et les latitudes moyennes s'expliquerait par une perturbation de la cellule de transport de chaleur méridienne tropicale (cellule de Hadley), qui affecte l'intensité et la position du courant-jet aux moyennes latitudes. La modification de ce courant-jet change à son tour les zones de genèse des tempêtes et l'intensité de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande dans sa zone de diffluence.

Il est fort probable que l'océan joue un rôle dans la persistance observée de la NAO en phase positive. En revanche, il apparaît aujourd'hui que l'intensification

de la variabilité interannuelle de la NAO et les fortes valeurs de l'indice NAO observées lors des dernières décennies ne peuvent être expliquées par l'unique action de l'océan. Des simulations de scénarios climatiques prenant en compte

les modifications chimiques d'origine humaine de l'atmosphère suggèrent que l'impact anthropique est fort sur l'occurrence des régimes NAO et privilégie de manière très sensible les phases positives. Il est donc vraisemblable que la combinaison de l'action de l'océan et de celle des gaz à effet de serre offre une hypothèse fiable pour expliquer les fluctuations de la NAO observées pendant les dernières décennies.

Dans cet article, en expliquant les anomalies climatiques à basse fréquence (la décennie) par la modification de comportements atmosphériques à haute fréquence (le jour), nous avons montré l'importance des interactions d'échelles temporelles pour la notion de variabilité. Nous avons insisté sur le caractère planétaire des mécanismes de connexion entre l'océan et l'atmosphère afin de comprendre des changements plus locaux. Il n'y a pas vraiment de frontières dans le temps ni dans l'espace. Des perspectives sont ouvertes dans cette voie, en particulier pour l'étude des événements extrêmes. Cette nouvelle approche des problèmes climatiques apparaît comme un défi scientifique autant que philosophique. Elle connecte la planète entière et transcende la notion de temps qu'il fait et de temps qui passe. Mon grand-père avait certainement raison quand il disait que le vent d'ouest d'aujourd'hui assèche tout.

Remerciements

Merci à l'équipe du Cerfacs pour son esprit et sa convivialité. Un merci tout spécial à Laurent Terray qui a été à l'origine de ce projet de thèse et l'a accompagné jusqu'au déferlement de la vague. Merci à Claire Périgaud pour le prédoc, merci à Clara Deser et Jim Hurrell pour le postdoc. Je voudrais enfin remercier le jury du prix André Prud'homme, ainsi que Jean-Claude André pour sa confiance et ses encouragements durant et après la thèse.

Bibliographie

- **Bainville V. et P. Ladoy**, 1995 : Préoccupations environnementales au début du XIX^e siècle ; la circulaire n° 18 du 25 avril 1821. *La Météorologie* 8^e série, n° spécial Histoire, 88-94.
- **Cassou C. et L. Terray**, 2001 : Dual influence of Atlantic and Pacific SST anomalies on the North Atlantic/Europe winter climate. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3195-3198.
- **Cassou C., L. Terray, J. W. Hurrell et C. Deser**, 2004 : North Atlantic winter climate regimes. Spatial asymmetry, stationarity with time and oceanic forcing. *J. Climate.*, sous presse.
- **Cayan D. R.**, 1992 : Latent and sensible heat flux anomalies over the Northern oceans: driving the sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 859-881.
- **Czaja A. et C. Frankignoul**, 1999 : Influence of the North Atlantic SST on the atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2969-2972.
- **D'Andrea F.**, 2003 : Entre le temps et le climat, la variabilité intrasaisonnière de l'atmosphère. *La Météorologie* 8^e série, 41, 30-37.
- **Démory M. E.**, 2003 : Étude de l'influence du réchauffement climatique dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre sur le climat de la région Europe-Atlantique nord. Tech. Rep. TR/GMGC/03/66, disponible au CERFACS, Toulouse.
- **Deser C. et M. Blackmon**, 1993 : Surface climate variations over the North Atlantic ocean during winter, 1900-1989. *J. Climate*, 6, 1743-1753.
- **Drevetton C.**, 2002 : L'évolution du nombre de tempêtes en France sur la période 1950-1999. *La Météorologie* 8^e série, 37, 46-56.
- **Gillett N., H. F. Graf et T. J. Osborn**, 2003a : Climate change and the North Atlantic Oscillation. *Eds. Geophysical Monograph Series*, 134, 193-209.
- **Gillett N., F. W. Zwiers, A. J. Weaver et P. A. Scott**, 2003b : Detection of human influence on sea-level pressure. *Nature*, 422, 292-294.
- **Hulme M. et M. G. New**, 1997 : Dependence of large scale precipitation climatologies on temporal and spatial sampling. *J. Climate*, 10, 1099-1113.
- **Hurrell J. W.**, 2003 : An overview of the North Atlantic Oscillation. *Eds. Geophysical Monograph Series*, 134, 1-22.
- **Kalnay E. et al.**, 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- **Namias J.**, 1964 : Seasonal persistence and recurrence of European blocking during 1958-1960. *Tellus*, 16, 394-407.
- **Neelin J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.-F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata et S. E. Zebiak**, 1998 : ENSO theory. *J. Geophys. Res.*, 103, 14261-14290.
- **Rogers J.**, 1984 : The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 12, 1999-2017.
- **Terray L. et C. Cassou**, 2002 : Tropical Atlantic sea surface temperature forcing of the quasi-decadal climate variability over the North Atlantic-Europe region. *J. Climate*, 15, 3170-3187.
- **Walsh J. E., A. S. Phillips, D. H. Portis et W. L. Chapman**, 2001 : Extreme cold outbreaks in the United States and Europe, 1948-99. *J. Climate*, 14, 2642-2658.

Libre opinion de l'auteur

Il semblerait que le climat, ces derniers temps, soit énergique. Tous les caprices de l'atmosphère sont affublés du titre pompeux : « du siècle ». Peut-être que le climat veut jalousement coller à notre mentalité qui vante le toujours plus grand, le toujours plus extrême. El Niño 1997-1998, Niño du siècle ;

le cyclone Mitch (novembre 1998), cyclone du siècle ; les inondations en Chine (été 1999), mousson du siècle ; les tempêtes de Noël en Europe (1999), coup de tabac du siècle ; la canicule de 2003, chaleur du siècle ; la crue du Rhône en 2003 encore, débit du siècle ; 2005... du siècle ; 2010... du millénaire !!!

Aucun scientifique ne s'aventurera officiellement à lier un événement isolé au changement anthropique. Il est vrai qu'il est impossible, de par la nature même du climat, de dire haut et fort : « Voilà la conséquence directe de la folie de l'homme. » La rigueur mathématique nous l'interdit. Et pourtant, dans les couloirs des laboratoires où les discussions sont passionnées et libres, dans les conférences, qui doute de la signature humaine dans les sursauts du climat des dernières années ? Ils sont bien peu. Le climatologue est aujourd'hui tiraillé entre ses convictions et un discours prudent. Las de se faire traiter de « Cassandre moderne » ou d'être catalogué « réactionnaire », il déclare simplement que les fièvres du climat sont cohérentes avec les simulations de scénarios du climat futur intégrant l'impact des activités humaines. Autant que sur la répétition d'événements forts et leur dispersion planétaire, les convictions du climatologue reposent sur une perception stomacale et, simplement, sur le bon sens. Comment notre planète serait-elle insensible au rejet, en seulement deux siècles, de pratiquement tout le gaz carbonique qu'elle a mis des millénaires et des millénaires à stocker ? Comment notre planète pourrait-elle être insensible au saccage, en cinquante ans environ, de la moitié de la forêt tropicale dont on connaît le rôle sur le climat de la Terre ? Comment notre planète pourrait-elle être insensible à la disparition d'espèces, destruction dont nous sommes responsables, alors que la diversité des écosystèmes s'est construite sur des milliers d'années et que la vie elle-même repose sur la biodiversité ? Que dire des réserves de biomasses océaniques qui s'étiolent ? La liste est longue...

Il semblerait que nous ayons oublié qui nous sommes. « *Tout ce qui arrive à la Terre arrive aux enfants de la Terre. Ce n'est pas l'homme qui a tissé la trame de la vie : il en est seulement le fil. Tout ce qu'il fait à la trame, il le fait à lui-même* », disait Chief Seattle au XIX^e siècle. Nous faisons partie du système Terre. Nous ne possédons pas la Terre, nous l'empruntons aux générations futures. Nous sommes connectés d'une manière ou d'une autre à l'arbre tropical que nous laissons abattre, au paysan sud-américain qui ne peut plus se nourrir, ruiné par les effets pervers de notre modernité. Peut-être est-il temps de donner un visage plus humain à nos comportements, avec tout le caractère sacré de compréhension et de respect vis-à-vis de la planète que ce mot peut suggérer ? L'espoir et la réussite en ce domaine existent. Si l'on se pose un peu et si l'on s'extirpe des modes de pensée et d'action imposés par le diktat des politiques socio-économiques menées au nom du développement, il est probable que le bon sens nous révélera les réflexes simples à abandonner ou à adopter pour protéger notre environnement, c'est-à-dire en fin de compte nous-mêmes. Il s'agit de s'adapter aux changements que nous vivons déjà aujourd'hui, mais aussi de travailler pour les générations futures en atténuant nos impacts sur le système Terre. L'exercice est difficile, mais sans cette prise de conscience du maintenant et du demain, nous allons droit dans le mur... et peut-être plus rapidement que nous ne le pensons.