

Le changement climatique et la probabilité des tempêtes sur l'Atlantique Nord

Les tempêtes de 1999 ont représenté pour certains l'effet annonciateur de bouleversements climatiques auxquels nous exposerait la poursuite d'une utilisation inconsidérée des combustibles fossiles. Pourtant, si le réchauffement du climat est d'ores et déjà avéré, les observations actuelles ne permettent pas de révéler une tendance séculaire à l'augmentation de la probabilité des tempêtes en France ou en Europe. De plus, s'il faut s'attendre à une amplification future du réchauffement climatique, il n'est pas possible à ce jour de dégager un consensus sur ce que nous réserve l'avenir concernant la fréquence ou l'intensité de ces tempêtes.

par **Serge Planton**
Météo France, Centre national de recherches météorologiques

Nombreux sont ceux qui ont été tentés de faire un lien entre le caractère exceptionnel des tempêtes de 1999 et le réchauffement

observé du climat. Mais un événement tel que celui-ci, pris isolément, ne peut pas nous renseigner sur une éventuelle modification durable de la probabilité des tempêtes car il est impossible d'en déduire une information de nature statistique. Il est, par contre, possible de s'intéresser à des événements de moindre intensité, mais plus fréquents, afin de tenter d'y déceler ce qui pourrait être un signal de changement climatique. L'article de Pierre Bessemoulin dans ce même numéro cite plusieurs études réalisées sur ce type d'événements, montrant que l'on n'observe pas de tendance significative sur le nombre et l'intensité des tempêtes en France au cours des cinquante dernières années. La figure 1 illustre cette absence de tendance sur le long terme.

Cette constatation n'est pas directement transposable à l'ensemble de l'Europe comme l'indique une étude conduite par des chercheurs suédois [1]. Ces chercheurs montrent en effet que l'intensité des vents les plus forts a augmenté à partir des années 60 en Europe du Nord et dans la région de l'Atlantique Nord-

Est. Mais ils soulignent aussi que cette augmentation fait suite à une diminution à partir

de la période 1881-1910 qui a connu des vents aussi intenses que ceux que l'on a pu constater au cours des dernières décennies. Ces mêmes chercheurs, dans une mise à jour récente de leur étude [2], constatent aussi que les valeurs extrêmes de vent estimées pour la Scandinavie ont commencé à diminuer au cours des cinq dernières années.

En résumé, il résulte des analyses conduites pour la France ou pour d'autres régions d'Europe, que la variabilité des caractéristiques des tempêtes

se situe à une échelle de temps de plusieurs décennies. Au contraire du réchauffement du climat constaté à l'échelle de la planète, il n'est donc pas possible de distinguer un signal de changement des caractéristiques des tempêtes sur les années récentes, pouvant se distinguer de la variabilité naturelle de ces événements. Mais bien que l'on ne puisse pas aujourd'hui détecter ce signal, il est légitime de se demander si l'amplification attendue du réchauffement planétaire ne le fera pas apparaître dans un avenir plus ou moins lointain.

Une compétition de mécanismes agissant sur les tempêtes

Une première façon de tenter de répondre à cette question est de se fonder sur un raisonnement tirant partie de nos connaissances sur les mécanismes de génération des tempêtes. Reprenons ici les principes de base exposés dans l'article de Pierre Bessemoulin et examinons en quoi ils nous permettent

d'anticiper l'influence possible de facteurs que nous savons liés à l'augmentation des gaz à effet de

serre dans l'atmosphère.

L'instabilité barocline est le phénomène prépondérant dans le creusement des dépressions et, donc, dans le développement des tempêtes. Cette instabilité est particulièrement importante dans la région du « rail des dépressions » dont la position est associée à un contraste thermique horizontal d'orientation principale sud-nord (gradient thermique). Le gradient thermique se manifeste sur toute la hauteur de la troposphère, jusqu'à une altitude proche de 10 km, celle du jet de vent d'ouest qui lui est associé.

Or nous savons que l'une des conséquences de l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère devrait être un réchauffement de la surface, et donc de la basse atmosphère, plus marqué aux hautes qu'aux moyennes latitudes (à cause de la fonte des glaces). Il en résulterait une réduction du gradient thermique sud-nord et, donc, une diminution de la fréquence des tempêtes à nos latitudes. A l'inverse, les projections du changement climatique indiquent aussi un réchauffement en altitude plus marqué dans les régions tropicales qu'aux moyennes latitudes (à cause de la convection orageuse sous les tropiques). Il s'ensuivrait, cette fois, une augmentation du gradient thermique sud-nord et, donc, de la fréquence de ces mêmes tempêtes. A ce stade, nous devons conclure que la modification des températures atmosphériques peut agir suivant des sens opposés sur la fréquence des tempêtes.

Une autre conséquence attendue de l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre est une augmentation du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Or la condensation de cette vapeur lors de la formation des nuages et de la pluie, est une source d'énergie pour l'atmosphère qui peut être à l'origine d'une augmentation de l'intensité des tempêtes. A l'inverse, certains chercheurs considèrent que cette augmentation de vapeur d'eau pourrait aller dans le sens d'une diminution de l'intensité des tempêtes car elle les rendrait plus efficaces dans leur rôle de transport d'énergie vers les hautes latitudes. Là encore, deux raisonnements argumentés conduisent à des résultats contradictoires s'appliquant dans ce cas à l'intensité des événements.

Force est de constater la limite de ce type de raisonnements qui, pris isolément, peuvent conduire à des conclusions erronées ou, considérés dans leur globalité, ne permettent pas de conclure. Des changements de fréquences et d'intensités des tempêtes peuvent donc se produire dans un contexte d'amplification des changements climatiques, mais suivant des mécanismes agissant dans des directions différentes rendant impossible toute évaluation *a priori*.

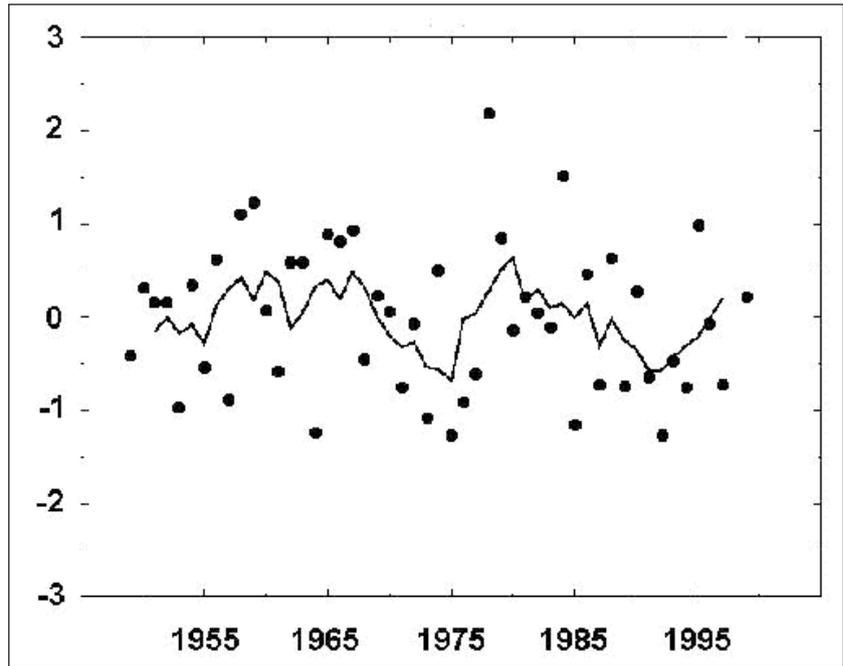


Fig. 1. - Indice normalisé d'intensité des plus fortes tempêtes en France observées annuellement de 1949 à 1999. La courbe représente une moyenne glissante de l'indice sur des périodes de 5 ans. L'indice oscille au cours du temps suivant une échelle de variabilité de plusieurs dizaines d'années, sans tendance marquée sur l'ensemble de la période.

La difficile modélisation des tempêtes

Une voie complémentaire à celle qui se fonde sur des raisonnements théoriques basés sur la physique et la dynamique de l'atmosphère, consiste à modéliser les phénomènes que l'on cherche à étudier. C'est aussi sur la modélisation

que s'appuient les anticipations des changements de température et d'humidité dont il est question plus haut. Cependant, le cas des tempêtes, comme celui de nombreux phénomènes extrêmes, se situe un peu à part, car à la limite des capacités des modèles. Avant de voir plus en détail ce qui rend la modélisation des tempêtes plus délicate, nous allons préciser ici ce que nous entendons par le terme de « modélisation ».

Les modèles climatiques sont de même nature que les modèles qui permettent de réaliser les prévisions météorologiques au quotidien. Comme ceux-ci, il s'agit de modèles mathématiques décrivant les facteurs d'évolution de différents paramètres suivant des lois

connues de la physique (mécanique des fluides, thermodynamique). La complexité de ces modèles ne permettant pas en général de déterminer simplement l'évolution des paramètres en fonction du temps, on fait appel à des

techniques de résolution numérique et donc à l'informatique. La simulation des changements climatiques, comme la prévision du temps, sont très exigeantes en ressources de calcul. Les calculateurs qu'elles partagent souvent sont parmi les plus puissants existant actuellement : ils sont aujourd'hui capables de réaliser plusieurs dizaines (et bientôt plusieurs milliers) de milliards d'opérations par seconde.

Mais les modèles de climat ont aussi des spécificités par rapport aux modèles atmosphériques de prévision du temps. Au contraire de ces derniers, ils sont utilisés pour représenter l'évolution des paramètres sur des périodes de temps de plusieurs dizaines, voire de centaines d'années. De plus, le climat ne dépend pas seulement de changements dans l'atmosphère, mais aussi dans les

océans, les glaces, la végétation... Ces différences impliquent que les modèles climatiques usuels ne puissent pas être utilisés pour décrire des phénomènes dont la taille est inférieure à quelques centaines de kilomètres afin d'économiser les ressources de calcul disponibles.

Nous touchons là à l'une des difficultés majeures de la modélisation des changements climatiques liés aux tempêtes. Comme précisé par Pierre Bessemoulin dans son article, les dimensions caractéristiques des systèmes dépressionnaires vont de 1000 à 2000 km, mais les tempêtes de décembre 1999 (Lothar et Martin) par exemple avaient des diamètres de 500 à 800 km. Encore s'agit-il là de phénomènes en pleine phase de maturité. La génération des tempêtes met en effet en jeu des précurseurs dont la taille peut être nettement plus réduite. Leur modélisation par les modèles climatiques ne peut donc être qu'imparfaite, au contraire des modèles de prévision météorologique, qui décrivent des échelles plus petites et qui de surcroît prennent en compte des observations qui peuvent les aider à reconstituer les phases de leurs formations.

Au-delà de la difficulté à reproduire les phénomènes avec une définition suffisante, il faut bien sûr aussi souligner les difficultés inhérentes à la modélisation des systèmes naturels dans toute leur complexité. De nombreux progrès ont été accomplis récemment dans la connaissance des cycles de vie des tempêtes, notamment à l'occasion de la campagne de mesures FASTEX qui s'est déroulée au-dessus de l'Atlantique Nord en janvier et février 1997. Mais il reste encore des zones d'ombre notamment dans la compréhension du déclenchement de la phase « explosive » de certains événements qui se distinguent par leur forte intensité. Ce que la théorie ne permet pas d'interpréter est bien sûr plus difficile à modéliser. Les modèles ont aussi leurs faiblesses connues, en particulier dans leur représentation des processus de condensation de la vapeur d'eau en nuages ou sous forme de précipitations.

Doit-on en conclure que les modèles climatiques ne nous permettent pas d'étudier l'évolution future de la fréquence ou de l'intensité des tempêtes ? La réponse est heureusement non car ces modèles permettent malgré tout de diagnostiquer des évolutions que l'on peut tenter de mettre en rapport avec la statistique de ces événements.

Des incertitudes méthodologiques

La première piste est l'étude de ce que les climatologues désignent comme l'Oscillation Nord Atlantique (ou NAO pour le sigle de sa traduction anglaise). Il s'agit d'une variation irrégulière de la pression atmosphérique au-dessus de l'Atlantique Nord qui lie la région de basses pressions voisine de l'Islande au fameux anticyclone des Açores.

Les phases positives de cette oscillation correspondent à un creusement de la dépression d'Islande et à un renforcement de l'anticyclone des Açores. Ces phases s'accompagnent d'une activité plus intense dans le rail des dépressions ainsi que son déplacement vers le nord. Certains scénarios de changement climatique simulent une augmentation de la fréquence des phases positives de la NAO et un déplacement vers le nord-est de ses centres d'actions. La figure 2 illustre

les résultats d'une équipe de chercheurs allemands montrant l'augmentation de la fréquence de ces phases au travers du calcul d'un indice de la variabilité de la NAO [3]. Pourtant il serait abusif d'en déduire que les tempêtes sur l'Europe ou sur la France, devraient augmenter consécutivement, car le lien entre cette oscillation et ces événements est loin d'être clairement établi.

Une autre piste consiste à analyser plus directement l'intensité de la variabilité de la pression atmosphérique dans le rail des dépressions et ses éventuels changements de localisation. Dans l'ensemble, les analyses faites à partir des résultats de différents scénarios de changement climatique vont dans le sens d'un déplacement vers le nord et vers l'est du rail des dépressions. Mais quelques études, dont une très récente réalisée aux Etats-Unis [4], montrent aussi une réduction de l'intensité de cette variabilité. Le défaut majeur de cette méthode d'investigation est qu'elle mélange des sources de variabilité autres que celle liée aux tempêtes sans réellement distinguer des événements particuliers.

C'est, *a contrario*, l'intérêt d'une autre approche qui consiste, elle, à déterminer les événements que le modèle est capable de représenter, puis à établir des statistiques sur ces événements. Les tempêtes simulées par le modèle sont, comme nous l'avons vu, affectées de défauts majeurs. Mais le pari est ici de supposer que les changements obtenus

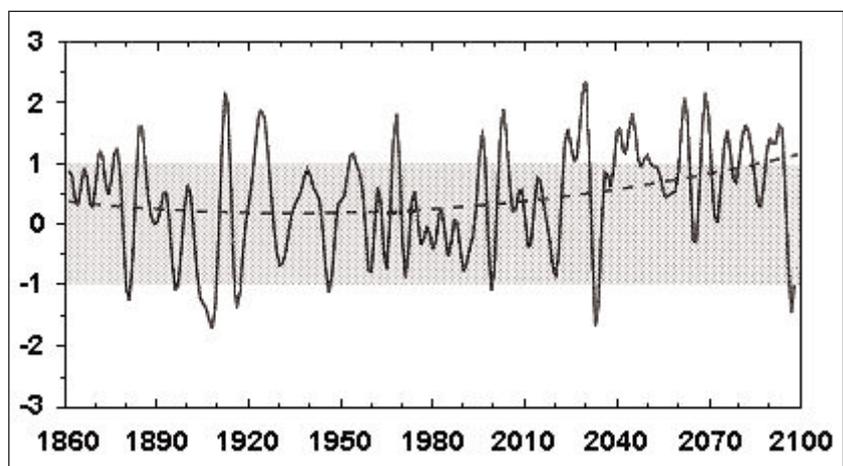


Fig. 2. - Indice normalisé de l'Oscillation Nord Atlantique (ou NAO) calculé par un modèle climatique. L'augmentation de l'indice au cours du temps se traduit par une activité plus importante dans le rail des dépressions

sur une population d'événements simulés, qui sont plutôt de trop faibles intensités par rapport à la réalité, pourront être transposés aux événements réels. Chaque dépression simulée en Atlantique Nord est donc repérée, puis suivie dans son déplacement afin d'alimenter des données statistiques prenant généralement en compte différentes classes d'intensité. Malgré ses imperfections, c'est la méthode la plus fiable et c'est donc sur celle-là que nous allons faire reposer le bilan des études les plus récentes sur la question.

Un bilan contrasté

Les deux études les plus anciennes convergent sur l'essentiel de leurs résultats. Il s'agit d'une étude canadienne datant de 1995 [5] et d'une étude anglaise réalisée l'année suivante [6]. Elles concluent à une réduction du nombre total de dépressions en Atlantique Nord, mais à une augmentation du nombre des tempêtes. Dans l'ensemble, la localisation des trajectoires des dépressions ne serait pas significativement modifiée. L'étude anglaise traduit ces caractéristiques en termes de distribution des intensités de vent. Il en résulte en particulier que l'intensité moyenne des vents pourrait augmenter sur l'Atlantique nord-est et le nord-ouest de l'Europe.

Suivant une étude hollandaise de 1997 [7], la réduction du nombre de tempêtes dans la plupart des régions de l'Atlantique Nord devrait s'accompagner d'une faible augmentation en mer du Nord et dans le golfe de Gascogne. Cependant à l'inverse des études précédentes, ces chercheurs soulignent que leurs résultats vont dans le sens d'une réduction de l'intensité de l'ensemble des tempêtes. Enfin, une étude allemande de 1998 [8], contredit l'ensemble des études précédentes en ne prévoyant pas de variation significative de l'intensité des tempêtes. Cette étude conclut aussi à un déplacement vers le nord-est de leurs trajectoires.

Ce bilan est donc pour le moins contrasté puisque plusieurs cas de figure sont représentés dans les résultats concernant la fréquence ou l'intensité des tempêtes. Pour ce qui concerne la localisation des trajectoires et donc du

rail des dépressions, les résultats vont d'une quasi-absence de modification à un déplacement vers le nord-est. Cette diversité de résultats s'explique par la compétition des mécanismes qui agissent sur les tempêtes et que les modèles reproduisent avec plus ou moins de réalisme. La variabilité régionale des changements liés aux tempêtes s'explique en particulier par les différences de températures simulées en Atlantique Nord qui modifient localement le gradient de température sud-nord à l'origine de l'instabilité barocline. Quelques voies de recherche sont cependant ouvertes et devraient permettre dans les années qui viennent de préciser notre vision des changements climatiques futurs concernant ces événements. Nous allons évoquer ici la plus prometteuse, à savoir la régionalisation du climat.

Une voie nouvelle : la régionalisation du climat

Toutes les études citées sont fondées sur l'utilisation de modèles climatiques décrivant des phénomènes dont la taille excède plusieurs centaines de kilomètres pour les raisons que nous avons indiquées. L'objectif de la régionalisation du climat est d'utiliser un moyen de réduire l'échelle des phénomènes décrits. En réduisant cette échelle, on espère aussi pouvoir décrire des phénomènes plus intenses dont les tempêtes qui touchent la France font partie. La régionalisation du climat a aussi une autre finalité, celle de mieux évaluer les impacts des changements climatiques dans différents secteurs socio-économiques comme l'énergie et l'agriculture. Le point de départ reste la modélisation à l'échelle de la planète des changements climatiques consécutifs à des scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre. Deux types de méthodes sont ensuite utilisés pour régionaliser ces changements.

Le premier consiste à tenter de relier les variables de grande échelle simulées

aux variables d'échelle régionale ou locale au moyen d'outils statistiques. Par exemple, on définit des types ou « régimes » de temps reproduits par le modèle, puis l'on essaye de caractériser la variabilité régionale et locale sous

Les modèles régionaux apportent une valeur ajoutée aux études de changement climatique en représentant de façon plus précise l'influence du relief

ces différents régimes à partir de données observées. Les principaux avantages de ces méthodes sont qu'elles tirent parti

des observations existantes à l'échelle régionale ou locale et qu'elles sont peu coûteuses. Elles présentent l'inconvénient majeur d'être ajustées sur des conditions climatiques actuelles sans que l'on puisse être assuré de leur validité dans le cadre de la projection dans un climat futur.

La deuxième classe de méthode concerne la régionalisation « dynamique » consistant en l'utilisation de modèles climatiques plus précis sur la région d'intérêt que les modèles climatiques employés habituellement. Ces modèles climatiques sont dits « régionaux ». Le double avantage de l'utilisation de modèles régionaux est de représenter explicitement la circulation et les variables climatiques à des échelles plus fines et d'autoriser la prise en compte d'échelles des forçages naturels ou anthropiques, elles aussi plus petites. Leur inconvénient majeur est leur coût en temps de calcul, d'autant que plusieurs simulations différentes sont généralement nécessaires pour évaluer l'incertitude des changements. Comparés aux observations, les modèles régionaux montrent une plus grande capacité à représenter le climat actuel que les modèles climatiques classiques. Ils apportent aussi une valeur ajoutée aux études de changement climatique en représentant en particulier de façon plus précise l'influence du relief.

Les techniques de régionalisation déjà appliquées pour préciser certains impacts des changements climatiques comme la variation de l'hydrologie du bassin du Rhône ou la détection du changement climatique en France, n'ont pas encore été exploitées pour analyser l'impact des changements climatiques sur la force du vent.

Cependant les laboratoires de recherches français spécialisés dans les études du climat, mais aussi les services de recherche et développement d'Electricité de France et du Centre scientifique et technique du bâtiment de Nantes, ont décidé de répondre à l'appel d'offres du programme national GICC (Gestion des impacts du changement climatique) dans un projet destiné à leur application. Ce programme, financé par le ministère de l'Ecologie et du Développement durable, a pour principal objectif de développer les recherches finalisées menées en France dans le domaine des impacts du changement climatique, pour mettre au point les outils et les méthodes qui permettront aux pouvoirs publics d'optimiser les stratégies de prévention de l'augmentation de l'effet de serre et d'adaptation au changement climatique.

Les techniques de régionalisation n'ont pas encore été exploitées pour analyser l'impact des changements climatiques sur la force du vent

de cette évolution. Cependant, si la tendance au regroupement des activités de recherche des centres climatiques européens est largement engagée, le regroupement de leurs capacités de calcul destinées à conduire ce type de recherche est aujourd'hui un défi qu'il conviendra aux décideurs nationaux et européens de relever. Dans le domaine de la recherche climatique et plus généralement des sciences de la planète, le Japon suivi de près par les Etats-Unis ont déjà relevé ce défi au travers de projets d'installation de capacités de calcul de l'ordre de 100 fois supérieures à celles qui sont utilisées à ce jour dans les centres spécialisés (projet japonais « Earth Simulator » et projet américain « ASCII »).

Les tempêtes sont, comme nous l'avons vu, influencées par des mécanismes agissant dans des directions opposées et diversement représentés par les modèles. Les progrès sur la compréhension et la modélisation de ces mécanismes sont liés aux recherches qui sont conduites en amont des études climatiques à partir de données de campagnes de mesures et de simulations très fines de l'atmosphère (à des échelles de quelques kilomètres). Ces recherches mobilisent l'activité d'une large communauté de chercheurs, en particulier intéressée par la prévision du temps à l'échéance de quelques jours, et font l'objet d'un effort soutenu. Les campagnes de mesures consistent en un renforcement des réseaux d'observation traditionnels par des mesures complémentaires faites à partir de bateaux, d'avions ou toutes autres plates-formes de mesures. Des campagnes de ce type sont d'ores et déjà prévues dans le cadre de programmes internationaux pour l'étude des événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes. Mais le temps nécessaire à l'exploitation de ces données pour améliorer les modèles climatiques est un temps de l'ordre de plusieurs années. Des progrès significatifs dans

ce domaine ne pourront donc pas être réalisés à brève échéance.

Dans ce contexte, faire une estimation du temps à partir duquel la communauté des chercheurs sera à même d'apporter une réponse claire sur les risques de changements futurs de la probabilité des tempêtes en Atlantique Nord, peut donc paraître hasardeux. Toutefois, le regroupement des activités de recherche au niveau européen déjà évoqué et l'effort de synthèse réalisé par la communauté scientifique sur le thème des changements climatiques dans le cadre du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), permettent d'espérer cette réponse avant la fin de la décennie actuelle. En l'état actuel des connaissances, toute annonce d'un consensus de la communauté scientifique sur ce que nous réserve l'avenir à propos des tempêtes, en particulier en France, ne peut être considérée que comme prématurée. ●

Un défi au niveau européen

Les tempêtes de 1999 ont suscité un intérêt renouvelé pour les recherches, dans le domaine des impacts du changement climatique lié aux activités humaines, sur la fréquence et l'intensité des tempêtes. L'étude de ce type de phénomènes se situe aux limites des capacités des modèles climatiques actuels, tant sur l'aspect capacité de calcul que celui de la représentation par les modèles des processus dans toute leur complexité.

Les capacités de calcul ont considérablement augmenté au cours des dernières années suivant un taux de croissance proche de celui de la fameuse « loi de Moore » (doublement des capacités de calcul en 18 mois). Cette progression devrait se poursuivre au cours des années qui viennent, rendant possible l'utilisation de modèles de plus en plus fins. La régionalisation du climat devrait directement bénéficier

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PLANTON, S., et P. BESSEMOULIN: Le Climat s'emballa-t-il ? La Recherche, n°335, pp 46-49, octobre 2000.
- [2] ALEXANDERSSON, H, H. TUOMENVIRTA, T. SCHMITH, et K. IDEN: Trends of storms in NW Europe derived from pressure data set, Climate Research, n°14, pp 71-73, 2000.
- [3] Ulbrich, U., et M. Christoph : A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing, Climate Dynamics, n°15, pp 551-559, 2001.
- [4] DAI, A., T.M. WIGLEY, B.A. BOVILLE, J.T. KIEHL, et L.E. BUJA: Climates of the twentieth and twenty-first centuries simulated by the NCAR Climate system model, Journal of Climate, n°14, pp 485-519, 2001.
- [5] Lambert, S.J.: The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths, Journal of Climate, n°8, pp 1447-1452, 1995.
- [6] Carnell, R.E., C.A. SENIOR, et J.F.B. MITCHELL : An assessment of measures of storminess: simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO2, Climate Dynamics, n° 12, pp 467-476, 1996.
- [7] BEERSMA, J.J., K.M. RIDER, G.J. KOMEN, E. KAAS, et V.V. KHARIN: An analysis of extra-tropical storms in the North Atlantic region as simulated in a control and 2XCO2 time-slice experiment with a high resolution atmospheric model, Tellus, n°49A, pp 347-361, 1997.
- [8] SCHUBERT, M., J. PERLWITZ, R. BLENDER, K. FRAEDRICH, et F. LUNKEIT: North Atlantic cyclones in CO2-induced warm climate simulations: frequency, intensity, and tracks, Climate Dynamics, n°14, pp 827-837, 1998.