

Stage de fin d'études réalisé au Bureau of Meteorology Research Centre, Melbourne, Australie, sous la direction de Graham Mills et Bertrand Timbal et parrainé par Jean-François Royer (CNRM), du 2 janvier au 3 juin 2006.

## «Impact du changement climatique sur l'occurrence des tornades de saison froide en Australie»

Raphaëlle KOUNKOU  
(Météo-France)

### Résumé

Il est à l'heure actuelle bien établi que le climat se modifie en raison des forçages anthropiques et le problème se pose de connaître l'incidence de ce changement sur les événements météorologiques extrêmes. Cette étude a pour but de déterminer l'impact du changement climatique sur l'occurrence d'un de ces phénomènes, les tornades de saison froide en Australie, en adaptant aux études climatiques un outil diagnostique développé au préalable pour des modèles de prévision

numérique. Après l'établissement d'une climatologie du risque de tornades de saison froide sur le XXe siècle et l'identification d'une corrélation négative avec l'indice du mode annulaire austral à l'aide des données des réanalyses disponibles, la méthode est employée avec les données des modèles climatiques sur le XXIe siècle. Les résultats font état d'une diminution de ce risque de tornades de saison froide liée principalement à une stabilisation de la troposphère, cohérente avec une hausse de l'indice du mode annulaire austral.

### Introduction

La problématique du changement climatique préoccupe de plus en plus nos sociétés. Son impact est souvent mis en relation avec les événements météorologiques extrêmes ; il est donc indispensable d'étudier l'évolution de ces phénomènes en regard du changement climatique. Cependant, ceux-ci sont difficiles à déceler par les modèles climatiques globaux car ils interviennent à des échelles trop petites pour être correctement représentées par ces modèles. Il est alors nécessaire de développer des outils diagnostiques pour déduire le risque d'événements extrêmes, comme les tornades, à partir de variables de grande échelle. Un tel outil a été développé au Bureau of Meteorology Research Centre (BMRC) pour détecter le risque de tornades de saison froide (Cool-Season Tornadoes, CST) sur l'Australie. Il est basé sur l'étude de deux paramètres, le cisaillement vertical du vent horizontal (Vertical Wind Shear, VWS) et l'indice de soulèvement en surface (Surface Lifted Index, SLI). C'est cet outil qui a été utilisé pour estimer l'impact du changement climatique sur le risque de CST à partir des données fournies par les modèles climatiques.

### 1 - Le risque de tornades de saison froide

#### 1.1 - Les tornades

Le mot tornade vient de 2 termes espagnols: «tronada» = orage et «tornar» = tourner. Une tornade est une tempête tourbillonnante de petite échelle (quelques centaines de mètres) et de courte durée de vie (quelques minutes) mais qui peut provoquer des ravages considérables. Associée à des phénomènes convectifs, elle se développe sous un cumulonimbus, lors d'un orage violent (figure 1). Les tornades peuvent se produire été comme hiver et ce qui les différencie réside dans l'origine de la convection (plutôt en air chaud l'été, plutôt en air froid l'hiver) et donc à l'environnement ; celui-ci doit être faiblement à modérément instable pour les tornades en saison froide contrairement à l'environnement favorable aux tornades dites estivales.

En Australie, il se produit en moyenne douze tornades par an dont la moitié en saison froide (figures 2 et 3), principalement sur l'Australie occidentale (Western Australia, WA) et sur l'Australie méridionale (South Australia, SA). Ces tornades de saison froide se forment dans des bandes frontales actives, des bandes ou lignes convectives au sein d'un fort flux cyclonique, des développements convectifs actifs en région de frontogénèse ou des développements de comma-clouds en air froid ; elles sont associées à des supercellules d'extension verticale limitée.

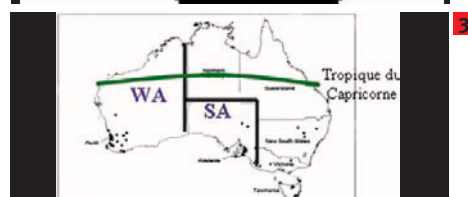
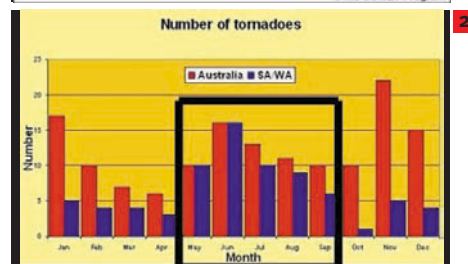
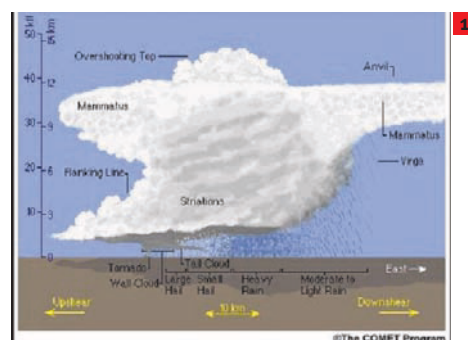


Figure 1: Schéma d'une supercellule pouvant donner naissance à une tornade.

Figure 2: Nombre total de tornades (en rouge) et pour l'Australie occidentale (WA) et l'Australie méridionale (SA) (en bleu) entre 1987 et 1996.

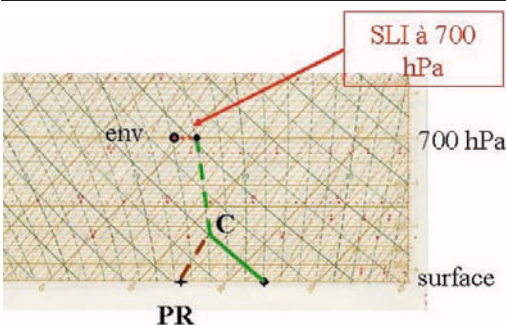
Figure 3: Localisation des tornades de saison froide observées pendant la période 1987-1996

#### 1.2 - Définition du risque de tornades de saison froide

Le Bureau of Meteorology (BoM) réalise opérationnellement la prévision des zones à risque de tornades en saison froide depuis 2000 par l'intermédiaire d'un outil qui caractérise l'environnement. Celui-ci nécessite le

calcul de deux quantités : la première quantité est le surface lifted index 700 hPa (SLI), qui donne une indication de l'instabilité (flottabilité) et qui correspond à la différence (figure 4) entre la température de l'environnement à un niveau donné (ici 700 hPa) et la température d'une particule de surface, dont la température et l'humidité sont connues, élevée de manière adiabatique jusqu'au niveau de condensation puis élevée de manière pseudo-adiabatique jusqu'au niveau considéré (700 hPa) ; la seconde quantité est le cisaillement vertical du vent horizontal en basses couches (VWS), exprimé comme la différence du vent à 850 hPa et du vent à 10 m, en ms-1. Pour calculer ces quantités il faut connaître la valeur des variables de grande échelle : la température en surface et à 700 hPa, la pression réduite au niveau de la mer et l'humidité spécifique en surface pour le SLI, les composantes zonales et méridiennes du vent en surface et à 850 hPa pour le VWS. Ces variables de grande échelle sont extraites des ré-analyses ERA-40 du CEPMMT <sup>(1)</sup> et de celles du NCEP/NCAR <sup>(2)</sup> (abrégié en NNR). Les ré-analyses sont obtenues après avoir rassemblé les observations des précédentes décennies et les avoir introduites dans un système de prévision moderne stable et plus performant que ceux qui étaient disponibles à l'époque où ces observations avaient été réalisées. Il permet de disposer d'une connaissance précise du climat des 50 dernières années. L'étude systématique des valeurs de SLI et de VWS calculées à partir des données des ré-analyses pour des cas avérés de tornades – tirés d'une base de données du BoM – permet d'identifier l'environnement propice à la formation de CST par une flottabilité (SLI) légèrement négative et un cisaillement (VWS) fort en basses couches. C'est donc ce type d'environnement qui caractérise le risque de CST.

Figure 4: Définition du «surface lifted index 700hPa (SLI)



### 1.3 - Climatologie du risque de tornades de saison froide

L'analyse du nombre d'environnements favorables par an sur la deuxième partie du XXe siècle montre que le risque de CST a une variabilité inter-annuelle forte. Elle montre aussi l'importance des données satellitaires dont le nombre n'a cessé de croître et la qualité de s'améliorer depuis que celles-ci ont commencé à être assimilées en 1978. Leur impact apparaît clairement sur la figure 5 qui montre une augmentation importante du risque de CST au niveau des années charnières 1978-1979 : cet impact a été particulièrement significatif pour l'hémisphère sud où les données d'observations étaient auparavant très peu nombreuses. Les tendances du risque de CST sur les deux régions considérées semblent contradictoires (hausse sur WA, stagnation voire baisse sur SA) : il est difficile de conclure car elles sont faibles et peu significatives en regard de la variabilité inter-annuelle. Par contre, les résultats montrent que ce risque est plus important pour les mois de juillet et août à 18.00 UTC et surtout à 00.00 UTC (figure 6).

Figure 5: Risque de CST par an entre 1958 et 2000 sur WA (à gauche) et SA (à droite) pour les deux ré-analyses.

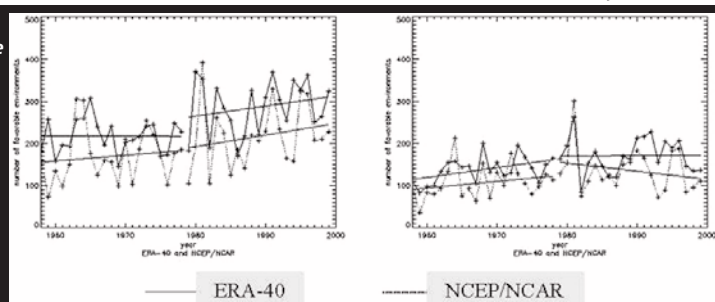


Figure 6: Distribution mensuelle (dessus) et horaire (dessous) du risque de CST sur l'Australie sur la 2e partie du 20e siècle pour les deux ré-analyses.

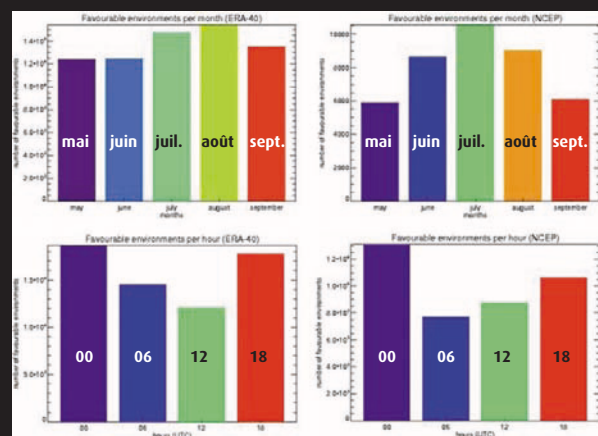
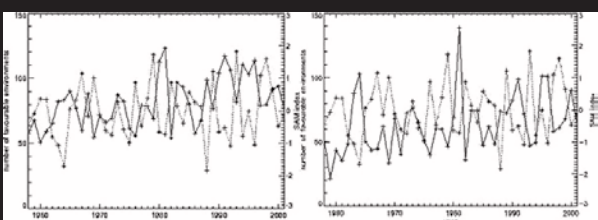


Figure 7: Variation du mode annulaire austral et du risque de CST sur la zone «WA et SA» entre 1958 et 2000.



La comparaison du risque de CST avec des indices climatiques a montré qu'il n'existait pas de corrélation significative avec l'indice d'oscillation australe (SOI). Elle a par contre mis en évidence une corrélation négative forte (figure 7) avec le mode annulaire austral (SAM). Le SAM est un mode de variabilité climatique à grande échelle qui domine les variations non saisonnières de la circulation troposphérique au-delà de 20° de latitude S. Il est caractérisé par des anomalies de pression de signes opposés entre l'Antarctique et les latitudes allant de 40° à 50° de latitude S et se définit numériquement par la différence des pressions mensuelles moyennes réduites au niveau de la mer à 40° et à 65° de latitude S.

La circulation atmosphérique moyenne des moyennes latitudes de l'hémisphère sud est dominée par un vortex circumpolaire qui s'étend de la surface jusqu'à la stratosphère. Une valeur positive du SAM est le signe de pressions plus élevées aux moyennes latitudes de l'hémisphère sud et de pressions plus basses sur l'Antarctique. Il en résulte un renforcement du vortex circumpolaire et

des vents d'ouest associés, ce qui entraîne pour l'Australie (située au nord du maximum de vent) une diminution des vents d'ouest. Le risque de CST est plus élevé pour un SAM négatif, c'est-à-dire lorsque le maximum des vents d'ouest associé au vortex circumpolaire migre vers les moyennes latitudes, donnant ainsi des vents d'ouest plus importants sur l'Australie. Il est plus faible pour un SAM positif, c'est à dire lorsque le maximum des vents d'ouest associé au vortex circumpolaire migre vers les hautes latitudes, donnant ainsi des vents d'ouest moins importants sur l'Australie.

Les phénomènes mis en jeu dans la genèse de l'environnement favorable aux CST sont complexes et de nombreux facteurs interviennent. Néanmoins, les résultats obtenus avec l'outil diagnostique sur la seconde partie du XXe siècle permettent de l'appliquer également aux prévisions des modèles climatiques pour le XXIe siècle afin d'estimer l'impact du changement climatique sur le risque de CST.

## 2 - Impact du changement climatique sur le risque de tornades de saison froide

### 2.1 - Les modèles et scénarios proposés par le GIEC

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a été créé en 1988 par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) afin d'évaluer les informations disponibles sur la science, les effets et les aspects socio-économiques de l'évolution du climat et de rendre des avis à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC).

Les modèles de circulation générale, couplant océan et atmosphère, simulent le système climatique à partir d'un petit nombre de conditions extérieures et sont utilisés pour des études sur le changement climatique, son origine, ses mécanismes. Cinq de ces modèles en provenance de diverses institutions sont utilisés ici : CCM (Canada), CNRM (France), INM (Russie), IPSL (France) et MPI (Allemagne). En 1992, le GIEC a produit des scénarios d'émission de gaz à effet de serre correspondant à divers types de développement économique et démographique qui sont utilisés conjointement avec ces modèles pour élaborer la trame des modifications possibles du climat. Ils permettent d'une part de vérifier la qualité des modèles en comparant leurs résultats sur le XXe siècle (expérience 20C3M) et d'autre part d'explorer les évolutions possibles du climat. Le scénario retenu ici, SRES A2, décrit un monde très hétérogène, avec une population mondiale toujours croissante et un développement économique fragmenté. Cela se traduit en terme de variation des gaz à effet de serre par une augmentation très importante de la concentration en CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et CFC (figure 8). Ce scénario climatique est le plus sévère mais hélas le plus probable. En outre, il permet a priori d'obtenir une réponse et un signal plus marqués en raison des forçages importants qui le caractérisent. Deux périodes sont à notre disposition pour ce scénario, 2046-2065 et 2081-2100.

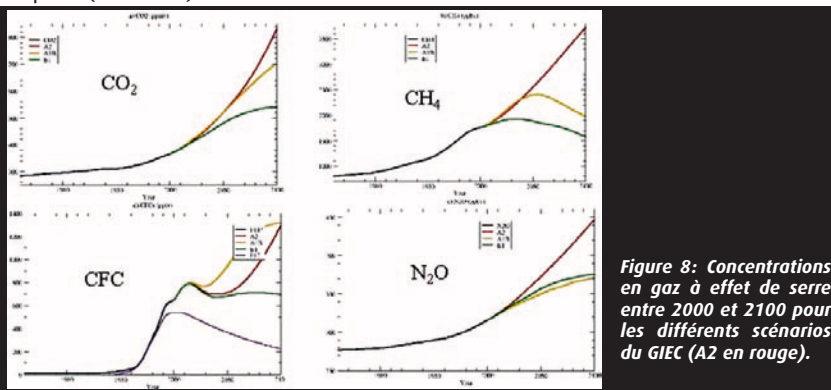


Figure 8: Concentrations en gaz à effet de serre entre 2000 et 2100 pour les différents scénarios du GIEC (A2 en rouge).

### 2.2 - Contrôle des modèles de la base de données du GIEC sur le XXe siècle

La comparaison des fonctions de distribution de probabilité du SLI et du VWS (figure 9) permet de noter la similitude de comportements avec les ré-analyses ERA-40 et NNR malgré un décalage vers les basses valeurs du SLI et vers les hautes valeurs du VWS pour la ré-analyse NNR. Les prévisions des modèles climatiques sont par ailleurs peu différentes de l'une ou de l'autre des ré-analyses (les modèles du CCM et du MPI donnent des résultats proches de la ré-analyse ERA-40, les modèles de l'INM et de l'IPSL donnent des résultats plus proches de la ré-analyse NNR et les résultats du modèle du CNRM se rapprochent tantôt de l'une, tantôt de l'autre des deux ré-analyses). Ces nuances sont liées aux différences de physique des modèles, mais surtout aux différences de résolution entre eux. Toutefois, les valeurs moyennes des distributions de SLI et de VWS des modèles climatiques se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance des ré-analyses.

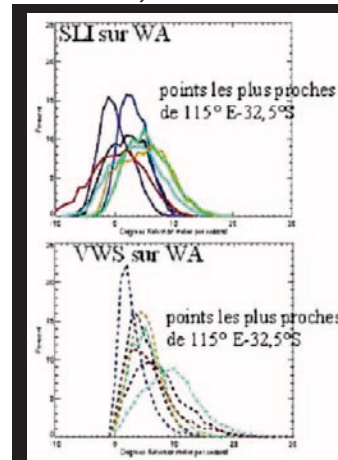


Figure 9: Fonctions de distributions de probabilités pour les ré-analyses (ERA-40: noir, NNR: violet) et les modèles climatiques (INM: rouge, CCM: vert, IPSL: bleu ciel, MPI: orange et CNRM: bleu) calculées sur le 20e siècle (expérience 20C3M)

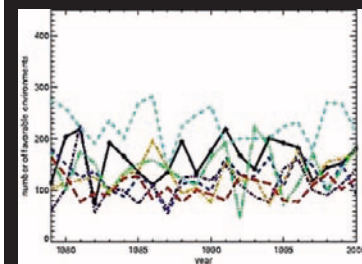


Figure 10: Evolution entre 1979 et 2000 du risque de CST sur WA et SA (ERA-40: noir, NNR: violet, INM: rouge, CCM: vert, IPSL: bleu ciel, MPI: orange, CNRM: bleu)

L'évolution du risque de CST de 1979 à 2000 (figure 10) présente une forte variabilité inter-annuelle. La variabilité obtenue avec les modèles climatiques est du même ordre de gran-

deur que celle qui est observée avec les ré-analyses. Les résultats concernant la tendance du risque de CST ne sont pas cohérents entre les divers modèles, et, la variabilité inter-annuelle étant importante, on ne peut pas conclure quant à l'existence d'une tendance significative sur le XXI<sup>e</sup> siècle, ce qui rejoint les conclusions obtenues avec la climatologie du risque de CST. L'identification du risque de CST est possible et satisfaisante avec tous les modèles et par conséquent l'application du diagnostic aux simulations du climat futur est envisageable.

### 2.3 - Etude du risque de tornades de saison froide au XXI<sup>e</sup> siècle

La comparaison des fonctions de distribution de probabilité du SLI obtenues avec les modèles pour la référence 20C3M et les deux périodes du scénario A2 (figure 11) montre que tous les modèles ont le même comportement avec cependant un décalage vers les fortes valeurs au XXI<sup>e</sup> siècle. En ce qui concerne les fonctions de distribution du VWS, les modifications sont moins significatives et diffèrent d'un modèle à l'autre. Le modèle du CNRM est le seul qui prévoit pour le XXI<sup>e</sup> siècle un léger décalage du VWS vers les fortes valeurs. A l'opposé, les modèles de l'IPSL et du CCM prévoient un décalage du VWS vers les basses valeurs tandis que les modèles du MPI et de l'INM ne prévoient pas de décalage du VWS. On en conclut que le SLI a tendance à augmenter au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, ce qui devrait impliquer une baisse du risque de CST (moins d'instabilité). Cette augmentation du SLI est liée à des modifications des variables de grande échelle utilisées dans le calcul (température et humidité spécifique en surface, température à 700 hPa). Par contre, on ne peut conclure

quant à une variation du VWS en raison de la variété du comportement des divers modèles. Quoiqu'il en soit, cette modification, si elle existe, ne sera pas très significative d'après nos résultats.

Que se passe-t-il si l'on traduit ces modifications en terme de risque de CST ? On remarque tout d'abord que les valeurs moyennes du risque de CST sur le XXI<sup>e</sup> siècle diffèrent d'un modèle à l'autre, mais que ceux-ci s'accordent à prévoir que ce risque va globalement diminuer (figure 12). Sur l'ensemble de WA et SA, la diminution moyenne est de 6,6 % et les valeurs vont de + 5 % à -15 % pour la

modèles	2046-2065	2081-2100
INM	-9 %	-48 %
CCM	-9 %	-20 %
IPSL	-15 %	-18 %
MPI	-5 %	-21 %
CNRM	+5 %	-10 %

Figure 12: Variation du risque de CST au 21<sup>e</sup> siècle sur WA et SA.

première période et de 23,4 % avec des valeurs de - 10 % à -48 % pour la seconde période. La modulation de la réponse entre les modèles est liée aux différences de comportement du SLI et du VWS. La réponse thermodynamique (hausse du SLI) étant cohérente pour tous les modèles, la diminution du risque de CST est principalement liée aux modifications du SLI. Cependant, la réponse dynamique (variations du VWS) varie d'un modèle à l'autre : la réponse est positive pour le modèle du CNRM (hausse du VWS donc hausse du risque de CST), négative pour les modèles de l'IPSL et du CCM (baisse du VWS donc baisse du risque de CST) et neutre pour les modèles du MPI et de l'INM (donc pas d'incidence sur le risque de CST). Les effets du SLI et du VWS s'annulent pour le modèle du CNRM et

conduisent à une augmentation du risque de CST pour la première période et à une diminution moindre que les autres modèles pour la seconde période. Ces changements sont dus à des modifications des variables de grande échelle utilisées pour le calcul du risque de CST : l'évolution de ces variables (figure 13) est caractérisée par une stabilisation de l'atmosphère

paramètre	réf. (1961-2000)	diff. 2046-2065	diff. 2081-2100
T <sub>surf</sub> (°C)	14,66	+1,58	+3,00
T <sub>700hPa</sub> (°C)	-2,34	+2,33	+4,24

Figure 13: Evolution moyenne des variables de grande échelle du 20<sup>e</sup> au 21<sup>e</sup> siècle (moyenne des modèles CNRM, MPI et CCM): température en surface et à 700 hPa et humidité spécifique en surface.

avec une hausse de la température plus grande en moyenne troposphère qu'en surface et plus d'humidité en

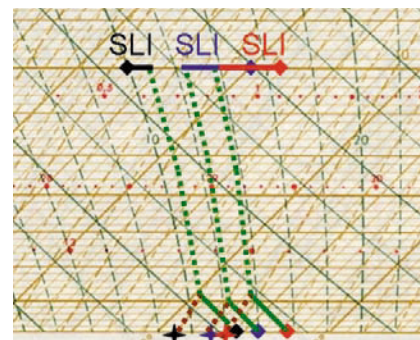


Figure 14: Variation du SLI entre le 20<sup>e</sup> siècle (en noir), 2046-2065 (en bleu) et 2081-2100 (en rouge).

surface. Le facteur principal pour la modification du SLI semble être la hausse de température à 700 hPa car la hausse de température et d'humidité en surface ont des effets contraires sur la valeur du SLI (figure 14). La modification de ces variables thermodynamiques est donc le facteur prépondérant qui conduit à un plus faible nombre d'occurrences d'un environnement favorable à la formation de CST (environnement moins instable). Il est par conséquent responsable de

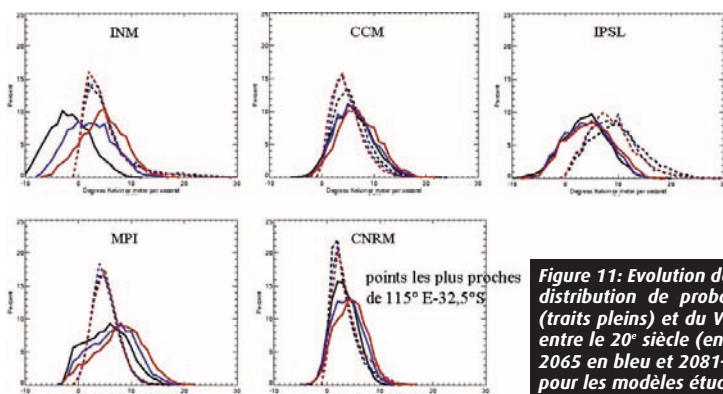


Figure 11: Evolution des fonctions de distribution de probabilités du SLI (traits pleins) et du VWS (pointillés) entre le 20<sup>e</sup> siècle (en noir) et 2046-2065 (en bleu) et 2081-2100 (en rouge) pour les modèles étudiés.

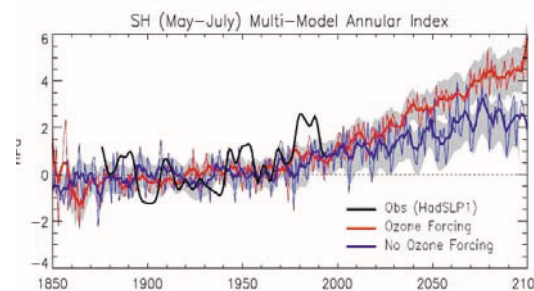


Figure 15: Evolution du SAM de 1850 à 2100 pour l'hiver austral: observations en noir et simulations avec (en rouge) et sans (en bleu) forçage à l'ozone (Miller et al., 2006).

la diminution du risque de CST au XXI<sup>e</sup> siècle. Par ailleurs, il a été montré que le SAM pour l'hiver austral (mai à juillet) va augmenter au XXI<sup>e</sup> siècle (figure 15). Le risque de CST étant corrélé négativement au SAM, une augmentation du SAM implique une diminution du risque de CST, ce qui corrobore le résultat obtenu.

### **3 – Conclusions et perspectives**

Cette étude est l'une des premières à analyser l'impact du changement climatique sur les tornades de saison froide. Elle a permis d'une part de caractériser le risque de tornades de saison froide par l'occurrence d'un environnement favorable et d'autre part de valider pour deux régions (WA et SA) et d'adapter à des études de climat un outil diagnostique développé au BMRC pour des modèles de prévision numérique. Pour aller plus loin, il faudrait travailler avec tous les modèles de la base du GIEC et tous les scénarios du GIEC, ce qui permettrait de préciser la réponse avec un grand nombre de modèles climatiques et de la moduler en fonction des divers scénarios. De même, il serait intéressant de réaliser une étude similaire sur d'autres pays touchés par les tornades de saison froide, notamment en Europe de l'Ouest : la France, bien que moins touchée, connaît par exemple quelques tornades, avec environ deux cas significatifs par an dont un tous les deux ans, en moyenne, en hiver. On disposerait alors de nouveaux éléments pour évaluer l'impact du changement climatique sur les CST à une échelle globale. La compréhension des événements extrêmes et de leur climatologie est actuellement un véritable enjeu qui a été retenue comme axe de travail particulier par le GIEC dans l'optique de son rapport de 2007.

Qu'il s'agisse de tornades à petite échelle (Espagne, 2005) ou de cyclones type Katrina (Etats-Unis, 2005), ces événements extrêmes font de plus en plus parler d'eux...

*1/Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme*

*2/National Center for Environmental Prediction et National Center for Atmospheric Research*