

ANNEXE C

Impact sur le comportement des ouragans du bassin Atlantique Nord

Fabrice Chauvin et Jean-François Royer
CNRM/Météo-France

Résumé

Deux expériences à haute résolution ont été analysées afin de déterminer les changements simulés par le modèle en terme de nombre de trajectoires, nombre de jours et structures des cyclones tropicaux dans l'océan atlantique nord. Un logiciel de suivi des dépressions de moyennes latitudes, développé au sein de Météo-France, a été adapté pour les besoins en détection de cyclones. Cela supposait de repenser en partie la structuration du logiciel. Le calibrage des paramètres du logiciel a été réalisé de manière à obtenir le nombre d'ouragans climatologiques calculé sur la période 1944-96 (Tropical Prediction Center, NOAA) sur l'Atlantique Nord. Parmi les valeurs possibles des paramètres, on retrouve des seuils utilisés dans la littérature (Bengtsson et al., 1995, Walsh, 1997) qui ont finalement été adoptés pour le logiciel. La comparaison des trajectoires, obtenues dans chacune des deux expériences, avec la climatologie des 50 dernières années indique une tendance du modèle à favoriser la cyclogénèse dans le golfe du Mexique au détriment du bassin atlantique ouest. Les deux expériences diffèrent largement dans la réponse des ouragans au scénario d'augmentation des gaz à effet de serre (GES), puisque le nombre total de trajectoires augmente pour l'expérience B2/résolution uniforme et diminue pour l'expérience A2/résolution variable. Les deux expériences s'accordent néanmoins sur un affaiblissement de l'activité cyclonique sur le golfe du Mexique. Les résultats obtenus par le comptage direct des ouragans sont confirmés par le calcul indirect, basé sur la méthode de Gray (1975), d'un indice de cyclogénèse à partir des variables d'environnement. Une analyse composite montre que, malgré leur réponse différente, les deux expériences voient les précipitations associées aux systèmes cycloniques augmenter dans un climat réchauffé.

1. Introduction

La réponse des cyclones tropicaux au réchauffement climatique est un sujet d'étude dont aucune conclusion claire n'a pu, jusqu'à aujourd'hui, émerger de l'ensemble des travaux qui y ont été consacrés. Le 3ème rapport du GIEC, édité en 2001, souligne le manque de convergence des réponses des divers modèles utilisés dans la communauté scientifique. Plusieurs raisons peuvent être avancées pour cela : la complexité des phénomènes cycloniques, qui fait intervenir des mécanismes de couplage océan-atmosphère très forts, leur taille, qui, pour être correctement représentée, demande des résolutions de modèle très fines qui n'ont encore pas pu être atteinte à ce jour dans des simulations climatiques globales. Parmi la grande bibliographie consacrée au sujet, deux approches se distinguent, selon qu'on dispose d'un modèle à maille fine ou non : le comptage direct ou le calcul de paramètres représentatifs de l'activité cyclonique et dépendant principalement de l'environnement global du bassin étudié. Dès 1975, William Gray a mis au point une méthode de calcul de la cyclogénèse, à partir des champs saisonniers de vent, d'humidité et de température ainsi que du contenu thermique de l'océan (Gray 1975). A l'inverse, il a fallu attendre 15 ans pour que les méthodes de comptage direct donnent les premiers résultats (Broccoli and Manabe, 1990), pour ensuite être appliquées dans des simulations à résolution fine, moyennant le calibrage d'un grand nombre de paramètres (Bengtsson 1995). Depuis, de nombreuses études ont poursuivi ces deux approches sans pour autant aboutir à des résultats consensuels sur la réponse des phénomènes au réchauffement.

2. Description des expériences

Au cours des années 2000/2001, plusieurs simulations de 150 ans en mode couplé, ont été réalisées au sein du Groupe de Modélisation à Grande Echelle et Climat (GMGEC) (Royer et al., 2002). Ces simulations ont été, depuis lors, largement complétées, dans le cadre de notre participation au 4^{ème} rapport du GIEC (prévu pour 2007), par un ensemble de simulations climatiques, dont la configuration a été imposée par le GIEC (voir les détails des simulations demandées sur http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html). L'objectif de ces simulations est d'approcher la sensibilité du système climatique à l'augmentation, dans l'atmosphère, de la concentration des GES. Plusieurs scénarios d'évolution de cette concentration ont été élaborés au sein du GIEC, suivant différentes hypothèses de développement des sociétés au cours du prochain siècle (A2, B2, etc...). Pour des raisons évidentes de ressources informatiques, ce genre d'exercice ne peut s'effectuer qu'à des résolutions moyennes dont la taille de maille avoisine les 300 km. Pour étudier des phénomènes de petite échelle tels que les cyclones tropicaux, une résolution plus fine est souhaitable, voire essentielle. C'est pourquoi, des simulations avec prescription des températures de surface de la mer (TSM) ont été réalisées au sein de CNRM/GMGEC. Il s'agit de simulations à haute résolution en mode forcé à l'aide du modèle de circulation générale ARPEGE dans sa version climat (Déqué et al. 1994). Les températures de surface de la mer (TSM) utilisées pour «forcer» le modèle sont construites à partir d'analyses (Reynolds et Smith, 1994), pour le climat présent, auxquelles ont été ajoutées une anomalie de TSM provenant d'un scénario, pour le climat futur. Deux types d'expériences globales ont été réalisées dans le cadre de ce projet, une à résolution uniforme et l'autre à résolution variable avec pôle de résolution maximale sur l'océan atlantique (20° N-60°W) et facteur d'étirement de 2.5. Ces deux expériences présentent à peu près la même résolution sur l'ensemble du bassin Atlantique (d'à peu près 0.5°, soit environ 50 km). L'expérience à résolution uniforme est forcée par les TSM climatologiques de la période 1979-88, pour le climat présent, auxquelles ont été ajoutées les anomalies, calculées sur la période 2090-99, d'un de nos scénarios B2, pour le climat futur. Chacune des deux simulations couvre une période de 10 ans. L'expérience à résolution variable, quant à elle, comprend deux simulations de 30 ans chacune, chaque année étant forcée par le cycle annuel des TSM correspondant. Ainsi, une variabilité inter-annuelle est introduite dans cette expérience, par rapport à la précédente. La période de référence, pour le temps présent, s'étend de 1970 à 1999. Pour le climat futur, ont été ajoutées les anomalies de TSM, calculées sur la période 2070-99, d'un scénario A2 réalisé au Hadley Centre du service météorologique britannique. La figure 1 montre les anomalies de TSM pour chacune des deux expériences. On peut remarquer la grande différence entre ces deux champs, aussi bien en intensité qu'en structure spatiale. Beaucoup des résultats qui vont suivre pourront être éclaircis à la lumière de cette différence. Les simulations produisent des champs globaux mais seul un sous-domaine (0-50°N, 100°W-0°) a été sélectionné pour l'étude des ouragans afin de réduire l'espace disque nécessaire pour le stockage des sorties.

3. Méthodologie

La première étape de l'étude a consisté en un gros travail de désarchivage des fichiers de sortie des deux simulations. L'étude nécessite, en effet, de traiter plusieurs variables définies sur le bassin Atlantique Nord (jusqu'à 50°N) à haute résolution spatiale et temporelle. La résolution temporelle des variables du modèle étant de 6 heures, le volume de données à traiter est important.

Ensuite, nous avons appliqué un logiciel de suivi des dépressions de moyennes latitudes, développé par Franck Ayrault pendant sa thèse réalisée au sein de l'équipe GMME/RECYF (Ayrault, 1998) et désormais maintenu par Bruno Joly, de cette même équipe. Ce logiciel effectue le travail de calcul des trajectoires en 2 étapes : une phase de détection, basée sur la recherche du maximum de tourbillon relatif à 850 hPa et une phase d'appariement qui permet de regrouper 2 à 2 les maximums précédemment obtenus pour constituer des trajectoires.

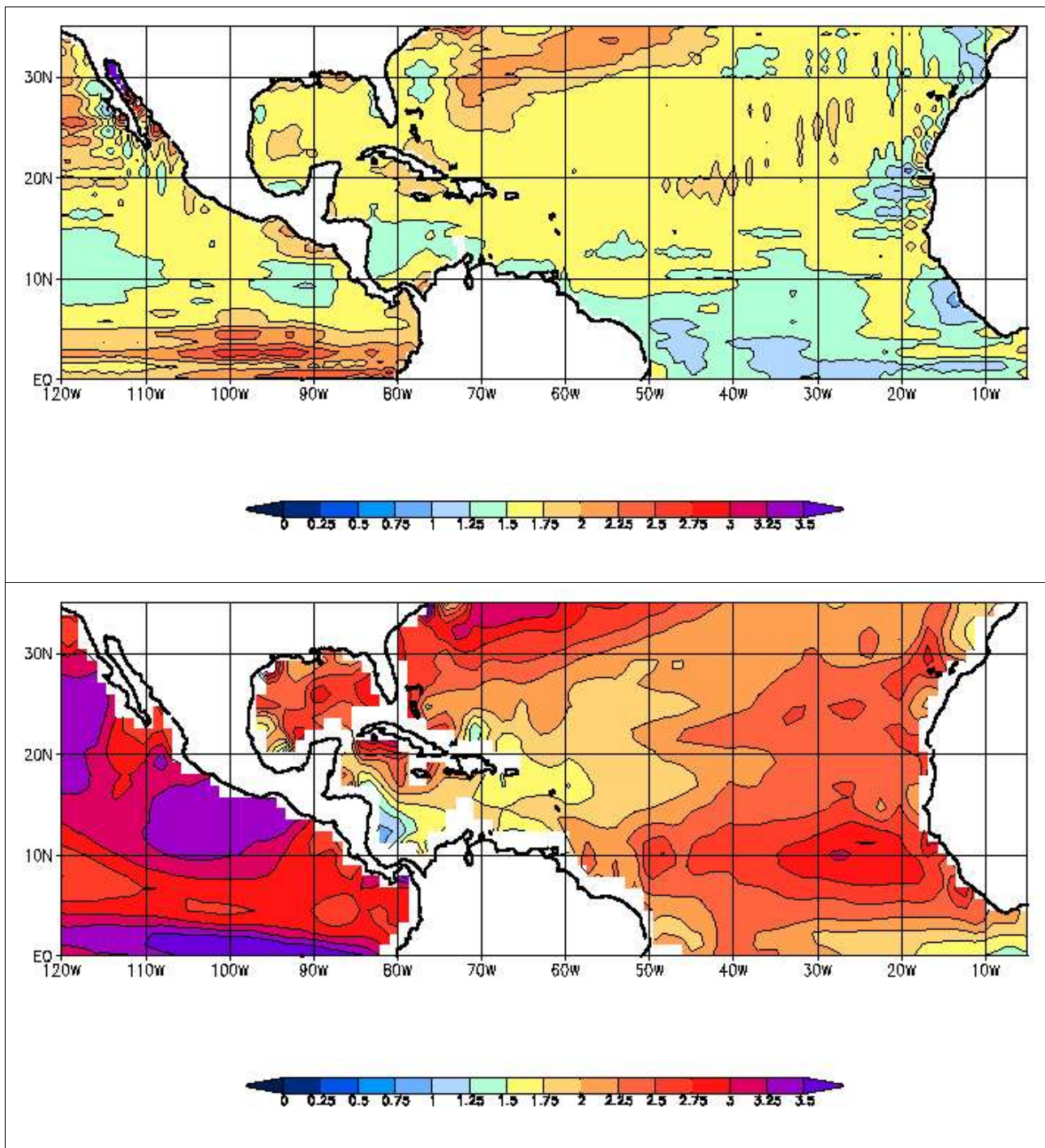


Figure 1 : Différences de TSM (Juillet-Août-Septembre) entre les climats présent et futur pour les expériences a) uniforme (moyenne sur 10 ans) et b) basculée/étirée (moyenne sur 30 ans). Contours tous les 0.25°C. Une fonction du logiciel GrADS effectuant un lissage spatial sur 9 points a été appliquée pour plus de lisibilité des figures.

Après une période de prise en main, nous avons dû fournir un effort d'adaptation à nos besoins car les critères de suivi des dépressions de moyennes latitudes ne correspondaient pas à ceux qui servent à suivre les cyclones tropicaux. En effet, dans la version originale, la phase de détection est assez simple alors que la phase d'appariement est délicate, du fait du grand nombre de maxima obtenus dans les régions de moyennes latitudes qui peut amener à des incertitudes dans les

appariements. Dans la version adaptée à la problématique des cyclones, l'accent est mis sur la phase de détection, un certain nombre de critères supplémentaires devant être remplis pour pouvoir caractériser un cyclone. Le choix de seuils pour les différents critères s'est avéré être la partie délicate du travail. Une fois la phase de détection effectuée, la construction de la trajectoire ne pose pas trop de problème car le risque d'erreur dans l'appariement est limité par le peu de candidats répondant simultanément aux critères.

Les critères les plus communément utilisés pour caractériser un cyclone sont les suivants (Bengtsson et al. (1995), Walsh (1997) et Nguyen et Walsh (2001)) :

- un minimum de pression au niveau de la mer (considéré comme le centre du cyclone),
- un vent à 10 m $>$ VS (seuil de vent),
- l'anomalie de température (entre le système et son milieu) moyenne entre 700 et 300 hPa $>$ TS (seuil de température),
- l'anomalie de température à 300 hPa $>$ anomalie de température à 850 hPa,
- le vent tangentiel à 850 hPa $>$ vent tangentiel à 300 hPa.

Afin de bien délimiter le système et son environnement, et tenant compte de la quasi-symétrie circulaire du cyclone, une notion de Rayon du Disque de Référence (RDR) a été introduite et est censée représenter la distance entre le centre du cyclone et le cercle caractérisant le gradient maximum de pression, c'est-à-dire, en première approximation, le cercle de vent maximum. L'utilisation de la pression au niveau de la mer, plutôt que le vent calculé par le modèle, s'est avérée plus robuste du fait de la moindre variabilité spatiale de cette variable. Ainsi, on peut définir le cyclone et son environnement par rapport à ce rayon. Dans le cadre de cette étude, on a choisi de prendre deux fois le RDR pour le rayon caractéristique du cyclone et 6 fois le RDR pour le rayon de l'environnement, ce qui correspond à une surface 9 fois plus grande.

Après la phase d'adaptation du logiciel, une étape de calibrage des seuils s'est imposée afin de rendre la détection la plus réaliste possible. C'est une partie délicate car le nombre de cyclones est sensible aux seuils imposés pour les différents critères. De plus, il est impossible de s'appuyer sur des observations pour valider la détection et le suivi des ouragans dans le modèle. En effet, pour avoir une idée des seuils à fixer, nous avons cherché à calibrer le logiciel sur les analyses opérationnelles du CEPMMT pour le mois de septembre 2000. L'assistance d'Alain Braun de l'équipe GMGEC/EAC pour le désarchivage desdites analyses a été des plus précieuses. Le but était de reproduire les trajectoires observées des ouragans de l'Atlantique Nord pour cette période. Malheureusement, les analyses opérationnelles du CEPMMT ont leurs propres défauts et les comportements des ouragans ne sont pas les mêmes que dans le modèle, ce qui rend la validation peu convaincante pour celui-ci. Néanmoins, cette étape a permis de vérifier qu'un bon ajustement des seuils permettait de représenter les trajectoires de manière réaliste dans les analyses, ce qui était encourageant pour la suite. Etant donné qu'une validation directe sur les analyses du CEPMMT n'était pas possible, une autre méthodologie devait être envisagée. Une méthode de validation globale a été retenue. Les paramètres sont réglés de manière à obtenir, sur les 10 ans du temps présent dont on dispose, un nombre annuel moyen de trajectoires proche de l'observation. La climatologie utilisée provient du Tropical Prediction Center (<http://www.nhc.noaa.gov>). Le nombre annuel moyen de systèmes a été calculé sur la période 1944-96 pour l'ensemble des tempêtes tropicales, des cyclones ou encore des cyclones de catégorie 3. Dans le cadre de cette étude,

l'ensemble des tempêtes tropicales a été retenu, ce qui donne un taux de 10 systèmes par an. En faisant varier indépendamment les seuils VS et TS, on peut calculer le nombre de trajectoires obtenues pour chaque couple (VS, TS) et déterminer quels couples produisent les taux les plus proches de la climatologie. Parmi les couples ainsi sélectionnés, on trouve des valeurs déjà obtenues dans d'autres études (Bengtsson et al., 1995). C'est ainsi qu'ont été retenus pour la suite de l'étude, des valeurs de seuil de vent et de température de 15 ms^{-1} et 3°C , respectivement, qui surestiment le nombre de trajectoires annuelles, compte tenu du fait que le logiciel de détection peut produire deux trajectoires pour un seul phénomène si un affaiblissement passager du système provient au cours de son évolution.

Un raffinement de la méthode de calcul des trajectoires, basé sur une étude de Camargo et Zebiak (2002) permet de compléter les trajectoires des cyclones détectés pour rendre compte de l'ensemble de leur évolution. Par cette méthode, on peut remonter à la cyclogénèse des systèmes, voire à des phases antérieures. Son principe consiste, une fois calculées les trajectoires, à relaxer la plupart des critères qui ont permis leur obtention. On ne conserve que le critère de tourbillon. Ainsi, on peut compléter les trajectoires obtenues sans pour autant en créer artificiellement. En effet, ne peuvent être complétées que les trajectoires des systèmes ayant rempli, à un moment au moins de leur cycle de vie, tous les critères initialement imposés. Cette méthodologie s'avère très intéressante pour le calcul du nombre de trajectoires mais trouve ses limites lorsqu'il s'agit de compter le nombre de jours cycloniques, ceux-ci étant largement surestimés. Ainsi, dans la suite de l'étude, on n'a utilisé la relaxation des critères que pour le calcul du nombre de trajectoires.

4. Résultats

4.1 Impact du réchauffement sur les trajectoires

Les figures 2a et 2b montrent la densité de jours cycloniques (nombre de jours par boîte de 5° et par 20 ans) pour le climat présent, dans les deux expériences, sans relaxation des critères. Cette visualisation permet de bien mettre en valeur les zones d'activité cyclonique sur le bassin et autorise une comparaison avec la cartographie élaborée par William Gray, à partir des observations de la période 1952-1971 (Gray, 1975). De plus, nous avons élaboré la même cartographie, sur la période 1952-2002, à partir de la base de données officielle de la NOAA des ouragans et tempêtes tropicales sur le bassin atlantique, le golfe du Mexique et la mer des Caraïbes (dénommée HURDAT et accessible à l'adresse <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/>). La figure 3 montre la densité de jours cycloniques calculée à partir de cette base de données. Pour le modèle, les trajectoires du climat présent se concentrent principalement dans le golfe du Mexique avec une extension vers la côte Est des Etats-Unis, en accord avec une étude préliminaire sur les minima de pression effectuée au sein de l'équipe avant le démarrage du projet. Comparées à la figure 3, les figures 2a et 2b montrent les mêmes anomalies de densité, à savoir une importante surestimation de l'activité cyclonique sur le golfe du Mexique et une sous-estimation sur toute la zone est du bassin atlantique, entre 10°N et 20°N. De plus, l'expérience étirée surestime l'activité dans la mer des Caraïbes, à la différence de l'expérience uniforme. Ces anomalies sont de plus grande ampleur que la variabilité décennale observée dans HURDAT (avec notamment, la faible activité cyclonique des années 70 associée à la sécheresse sahélienne) et peuvent donc être considérée comme robustes.

En ce qui concerne la réponse de l'activité cyclonique à l'accroissement des GES (figures 2c et 2d), les deux expériences diffèrent largement puisque, globalement, l'expérience uniforme indique une augmentation alors que l'expérience étirée indique une diminution de l'activité cyclonique. Si l'on y regarde de plus près, la configuration spatiale des figures 2c et 2d indique néanmoins que ce désaccord ne concerne que la partie atlantique des moyennes latitudes, le golfe du Mexique répondant identiquement par une baisse notable de l'activité dans les deux expériences. On peut noter une extension de l'anomalie négative sur la mer des Caraïbes dans l'expérience étirée, là où celle-ci surestimait l'activité cyclonique dans le climat présent.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences de comportement entre les deux expériences : les fluctuations d'échantillonnage, les fluctuations dues au choix des critères, la variabilité interannuelle, le scénario envisagé (B2 ou A2) ou encore la technique de l'étirement de la grille en elle-même. Nous nous sommes attachés, dans la mesure de nos moyens, à étudier les aspects qui pouvaient l'être.

Pour ce qui est des fluctuations d'échantillonnage, nous avons procédé de la manière suivante : parmi les 30 ans de chacun des climats présent et futur de l'expérience étirée, un sous-ensemble de 10 années est sélectionné au hasard et on calcule le nombre de trajectoires (resp. jours cycloniques) pour le présent et le futur. En itérant la procédure un grand nombre de fois (dans notre cas, le nombre d'itérations est de 10^4 , ce qui est conséquent, tout en restant inférieur au nombre total de possibilités de sous-ensembles), on peut calculer la proportion de cas où le nombre total de trajectoires (resp. jours cycloniques) futur est supérieur au présent. Dans le cadre de cette étude, la proportion est de 0.86% pour le nombre de trajectoires et de 3.48% pour le nombre de jours cycloniques. Ceci peut être traduit en termes de significativité, c'est-à-dire que l'hypothèse selon laquelle les différences ne proviennent pas d'une fluctuation d'échantillonnage peut être acceptée à 99% dans le cas des trajectoires et 95% dans celui des jours cycloniques.

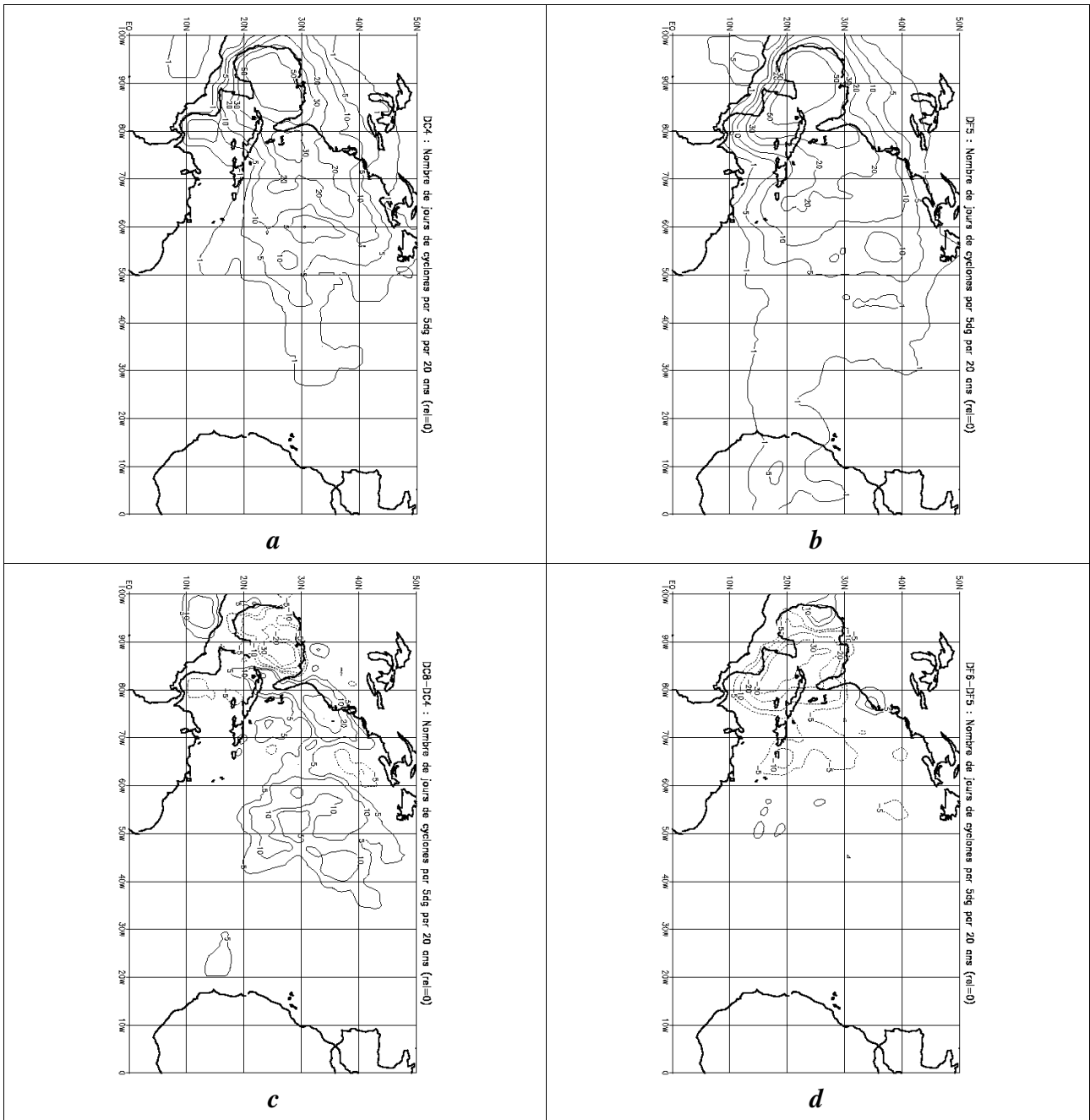


Figure 2 : Nombre d'ouragans par boite de 5° et par 20 ans dans le climat présent pour l'expérience a) uniforme (1979-88) et b) étirée (1970-99) et anomalie dans le climat futur pour l'expérience (c) uniforme (2090-99) et d) étirée (2070-99). Les intervalles sont non linéaires (1, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ouragans).

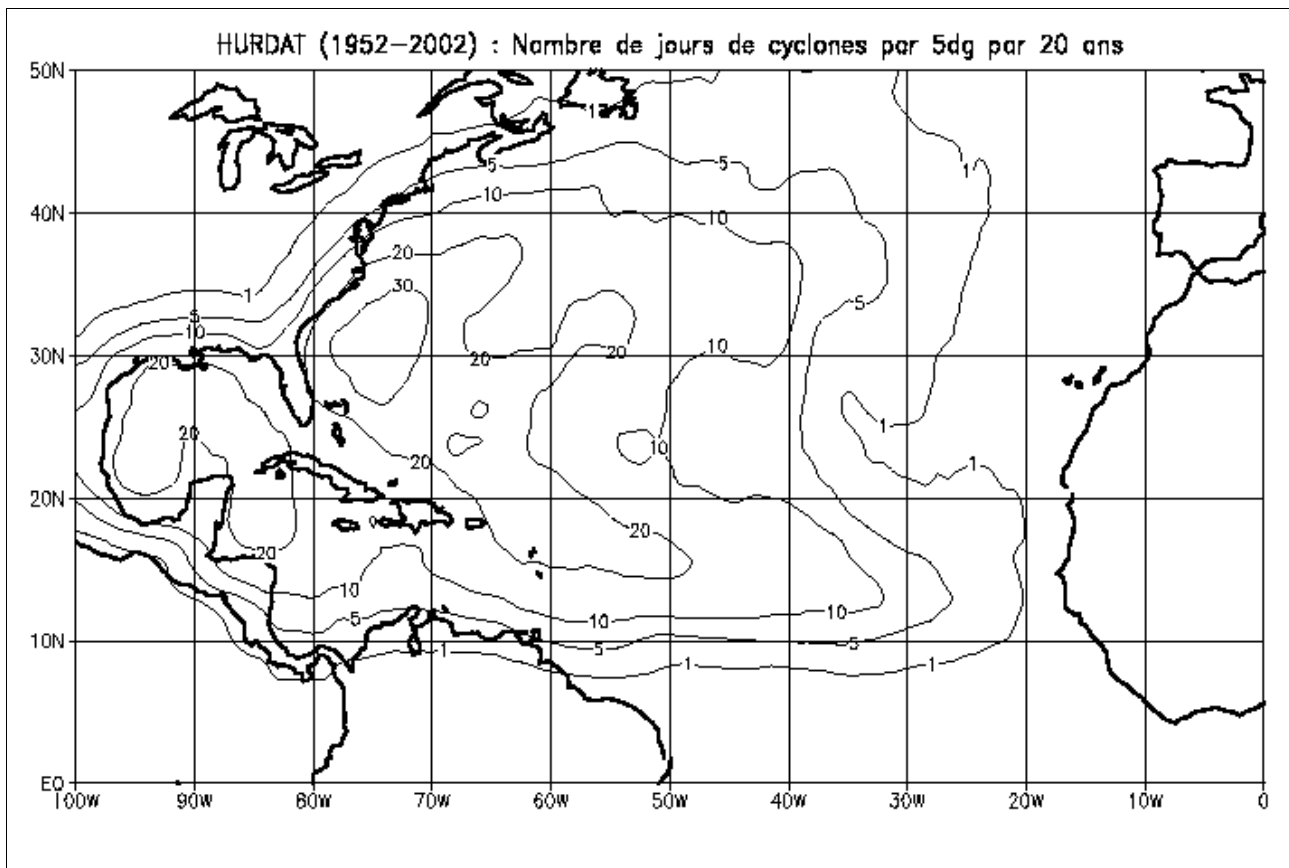
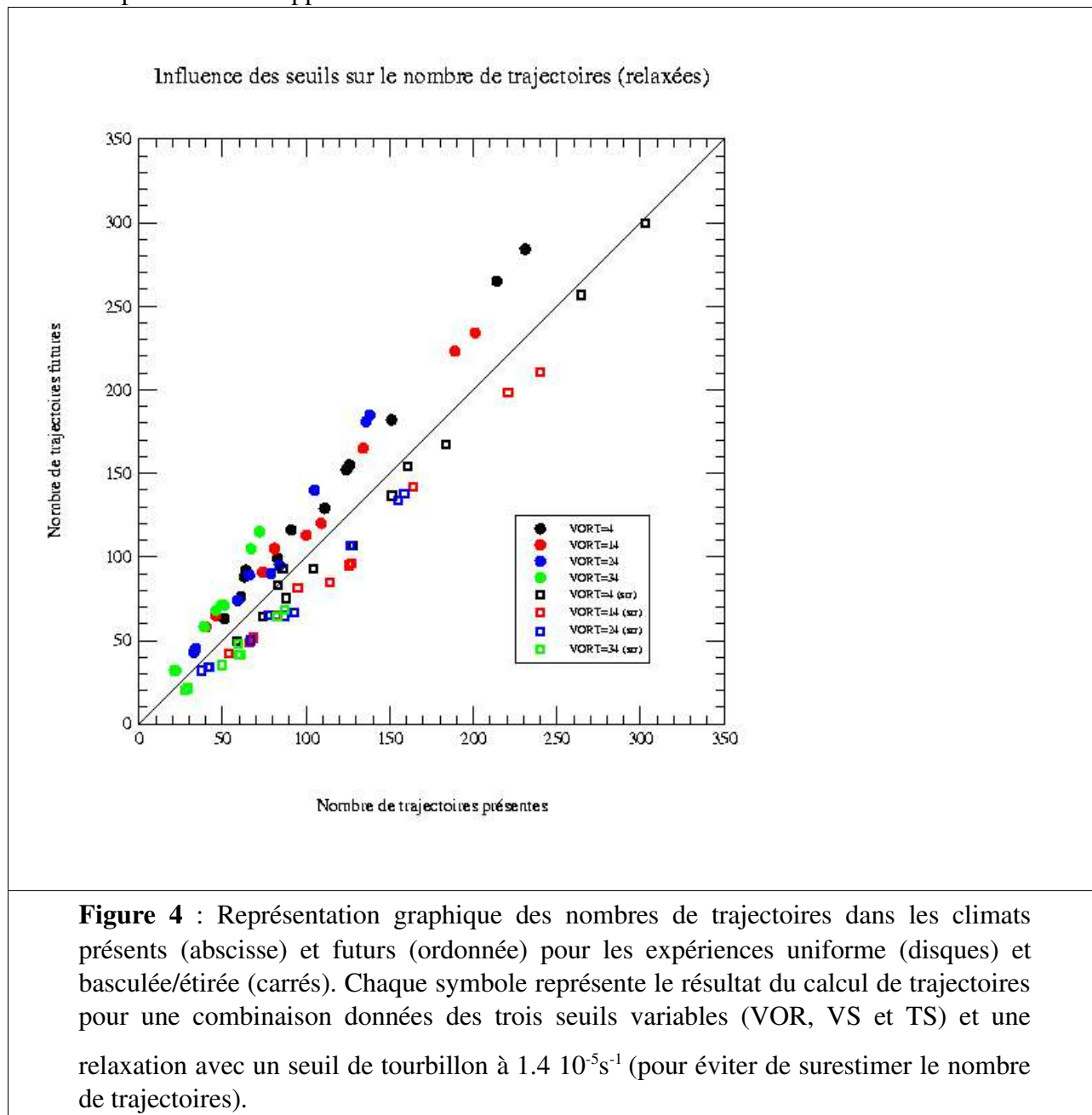


Figure 3 : Nombre d'ouragans par boîte de 5° et par 20 ans, calculé à partir des trajectoires de la base de données HURDAT, sur la période 1952-2002. Les intervalles sont non linéaires (1, 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ouragans).

Le choix initial des critères de sélection des ouragans était basé sur des considérations globales, c'est-à-dire qu'on avait cherché à ajuster le nombre total de trajectoires calculées à celui observé sur la période de référence 1952-71. Cette technique est très arbitraire, surtout que le nombre de trajectoires obtenues dépend, de plus, du critère de relaxation (qui n'avait pas été encore implanté lors du choix des critères). Ainsi, nous avons recalculé l'ensemble des trajectoires en faisant varier chacun des 3 critères à seuil : tourbillon, vent maximum et anomalie de température. Pour chacun des ensembles de trajectoires obtenus pour le présent et le futur, nous avons calculé le nombre de trajectoires (avec relaxation et une valeur de $1.4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ pour le tourbillon) et le nombre de jours cycloniques (sans relaxation). La figure 4 montre le nombre futur de trajectoires (en ordonnée) en fonction du nombre présent (en abscisse). Des résultats semblables sont obtenus si on considère le nombre de jours cycloniques, et l'on n'a donc pas représenté la figure correspondante. Chaque symbole représente une combinaison de critères donné. Pour chaque expérience, il y a donc 64 points à tracer. Lorsque les nombres présent et futur sont identiques, le point doit se trouver sur la diagonale. Tous les points sont situés au-dessus de la diagonale pour l'expérience uniforme. Tous les points sauf un sont situés en-dessous pour l'expérience étirée. Ainsi, on ne peut pas expliquer les différences entre les deux expériences par un choix arbitraire des critères de détection puisque ces différences persistent quelque soit la combinaison de critères choisie.

En ce qui concerne le choix du scénario envisagé, il n'est pas possible, pour l'instant, de savoir s'il a une influence sur la réponse puisqu'on ne dispose que de deux expériences. Une nouvelle

expérience étirée de 30 ans avec un scénario B2 est en cours de réalisation. Elle devrait nous apporter de précieux renseignements sur la réponse de l'activité cyclonique au type de scénario. L'éventuelle influence de la méthode d'étirement ne peut pas réellement être étudiée à des coûts raisonnables mais on verra, dans la suite, que la réponse de l'activité cyclonique obtenue dans l'expérience basculée/étirée est confirmée dans les scénarios couplés à basse résolution produits par le CNRM pour le 4ème rapport du GIEC.



4.2 Comparaison entre les méthodes directes et indirectes

Une autre manière d'appréhender la cyclogénèse dans les simulations climatiques ou dans les observations à échelle mensuelle est d'avoir recours à des approches indirectes de la cyclogénèse, telles que celle qu'a mis au point William Gray en 1975. Il s'agit de définir un certain nombre de variables environnementales favorables à la cyclogénèse et de construire un paramètre qui combine leurs effets respectifs. Ce dernier peut-être calibré dans le climat présent pour obtenir le nombre réel de cyclogénèses observées. Le paramètre de Gray est constitué de six variables, trois dynamiques et

trois thermiques, dont on associe les effets de manière multiplicative. Le potentiel dynamique comprend le cisaillement vertical du vent zonal, la vorticité et l'effet Coriolis. Le potentiel thermique comprend la stabilité de l'atmosphère, le contenu thermique de l'océan (avec un seuil minimal de 26 C pour le climat présent) et l'humidité de la moyenne troposphère. Royer et al. (1998), en revenant aux fondements de ces critères, ont remplacé le potentiel thermique total par le champs de précipitations convectives calculé par le modèle, qui est finalement représentatif de la combinaison des trois variables thermiques. Le potentiel simplifié, ainsi obtenu, avait alors montré une augmentation modérée de la cyclogénèse dans le scénario de doublement du CO₂ de l'époque.

En reprenant la formulation de Royer et al. (1998), nous avons calculé, pour les deux expériences, les potentiels présents et futurs, et vérifié que les différences entre les deux confirment celles obtenus par la méthode directe (figures 5a et 5b). Ces deux figures montrent bien la baisse, commune aux deux expériences, de la cyclogénèse dans le golfe du Mexique. L'expérience uniforme indique une augmentation partout ailleurs alors que l'expérience étirée montre une baisse substantielle de cyclogénèse en mer des Caraïbes. A noter que les deux expériences s'accordent plus ou moins sur une augmentation de la cyclogénèse cap-verdienne, avec un léger déplacement vers le Nord de celle-ci. Ces résultats indiquent, également, que les différences entre les deux expériences concernent aussi bien les phénomènes que leur environnement, donc qu'elles ne sont pas uniquement dues à des différences de représentation des systèmes cycloniques.

En effectuant les mêmes calculs pour les scénarios B11, A1B et A21 réalisés en T63 ( quivalent à une taille de maille d'environ 300 kilomètres de cotés) pour la préparation du 4 me rapport du GIEC, on obtient une réponse proche de celle de l'expérience étirée (non montré), excepté sur l'est du bassin pacifique, où la réponse est inversée, avec une augmentation au Sud et une diminution au Nord. On peut probablement voir, dans ce dernier point, l'effet du couplage, mais ceci sort du cadre de notre étude. Les anomalies de TSM de ces scénarios, bien que d'intensités différentes, sont également plus proches des anomalies de l'expérience étirée que de celles de l'expérience uniforme, notamment dans leur distribution spatiale. Ainsi, on peut penser que, plus que le scénario d'accroissement des GES en lui-même, ce sont les anomalies de TSM obtenues qui sont importantes dans la réponse des ouragans, et particulièrement la manière dont elles se répartissent spatialement.

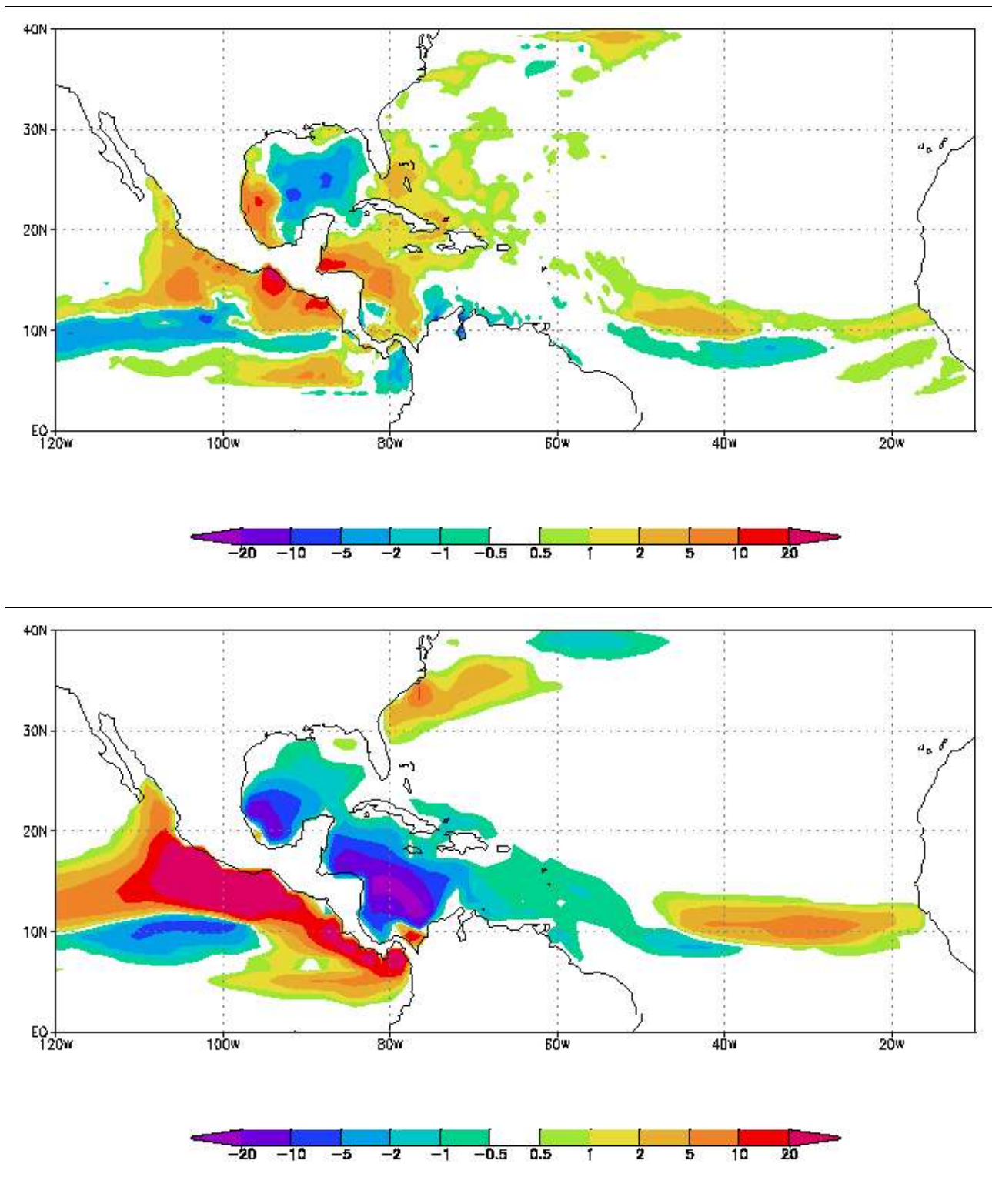


Figure 5 : Représentation spatiale de la différence, entre les climats présent et futur, de l'indice de cyclogénèse de Gray, amendé par Royer et al, pour les expériences a) uniforme et b) basculé/étiré. Les intervalles sont non linéaires (1, 2, 5, 10, 20 ouragans) positivement ou négativement.

4.3 Impact du réchauffement sur la structure des ouragans

Afin d'étudier la sensibilité des structures mêmes des ouragans au réchauffement, nous avons calculé des composites à partir de chacune des positions et des échéances des ouragans. Ainsi, pour chaque élément de trajectoire, on considère le champs étudié dans un domaine centré sur la position de l'ouragan et s'étendant sur 10° de part et d'autre du centre. Les champs moyens associés au système et son environnement ont ainsi été reconstitués pour les précipitations, la pression au niveau de la mer et le vent à 850 hPa pour chaque année de simulation. Ceci a permis de réaliser un test de Student pour vérifier si les champs moyens sont significativement différents entre les climats présent et futur. Il apparaît que les champs dynamiques sont peu influencés par le réchauffement alors que les précipitations marquent une augmentation faible (de l'ordre de 10% dans la partie nord-est du cyclone) mais significative dans les deux expériences, malgré leurs divergences. C'est un résultat logique puisqu'une atmosphère réchauffée peut contenir plus d'humidité et donc restituer plus d'eau lors des événements précipitants. Encore fallait-il le vérifier car une atmosphère plus chaude a également un seuil de saturation plus élevé qui pourrait induire une baisse des pluies dans ces mêmes phénomènes.

5. Conclusions

Les outils numériques dont on dispose actuellement ne permettent pas encore d'apporter de réponse catégorique quant au comportement des ouragans dans un climat réchauffé par l'augmentation des GES. En effet, deux expériences ont été réalisées au sein du CNRM, dans des configurations et avec des conditions aux limites différentes malgré une résolution spatiale sur le bassin atlantique similaire dans les deux cas : l'une en résolution variable, suivant un scénario A2 réalisé au Hadley Center et l'autre en résolution uniforme suivant un scénario B2 réalisé au CNRM. L'intérêt de la résolution variable est une économie notable de temps de calcul pour une représentation fine du phénomène local étudié, tout en conservant une représentation globale de l'atmosphère, ce qui évite les problèmes de conditions aux limites rencontrés lors de l'utilisation de modèles à aire limitée. Les réponses obtenues en termes de trajectoires ou de nombre de jours de cyclones sont contradictoires entre les deux expériences et ces différences sont robustes. Étant donné les différences de technique et de conditions de surface entre les deux expériences, il est difficile d'accorder plus de crédit à une simulation plutôt qu'à une autre. Notre sentiment est que le type de scénario imposé à l'atmosphère est fondamental, mais cela reste à prouver. Actuellement, une nouvelle expérience étirée, forcée avec un scénario identique à celui de l'expérience uniforme, est en cours de réalisation et devrait apporter un élément de réponse à cette question essentielle. Les deux expériences actuelles s'accordent néanmoins sur un point, malgré leurs divergences : dans les deux cas, les précipitations associées au phénomène cycloniques augmentent avec le réchauffement.

Parmi les raffinements qui pourront être apportés dans le futur, on peut encore envisager une réduction de la taille de maille, bien que celle utilisée dans cette étude (~50 kilomètres) soit déjà très fine pour des simulations climatiques pluriannuelles. Comme il a déjà été signalé, divers scénarios pourront être regardés pour en étudier la sensibilité de la réponse des ouragans. Enfin, une amélioration notable consistera à étudier des simulations couplées océan/atmosphère, ce qui a déjà été abordé dans cette étude mais pour des résolutions grossières. Le couplage océan-atmosphère est, en effet, un élément fondamental de la réponse des ouragans au réchauffement puisque ce sont des systèmes qui font interagir fortement les deux fluides.

6. Références

Ayrault, F., 1998: Environnement, structure et évolution des dépression météorologiques : réalité climatologique et modèles types. Doctorat de l'Université P. Sabatier, Toulouse. 328pp, février 1998.

Bengtsson, L., M. Botzet and M. Esch, 1995: Hurricane-type vortices in a General Circulation Model. *Tellus*, 47A, 175-196.

Camargo, S. J. and S. Zebiak, 2002: Improving the detection and tracking of tropical cyclones in atmospheric general circulation models. *Weather and Forecasting*, 17, 1152-1162.

Déqué, M., C. Dreveton, A. Braun and D. Cariolle, 1994: The ARPEGE/IFS atmospheric model: a contribution to the French community climate modelling. *Phys. Chem. Earth (B)*, 26, 149-153.

Gray, W.M., 1975: Tropical Cyclone Genesis, Dept. of Atmospheric Science Paper, No. 234, Colorado State University, Fort Collins, CO, 121 pp.

Nguyen, K. C. and K. J. E. Walsh, 2001: Interannual, decadal, and transient greenhouse simulation of tropical cyclone-like vortices in a Regional Climate Model of the South Pacific. *Journal of Climate*, 14, 3043-3054.

Reynolds, R.W. and T.M. Smith, 1994: Improved global sea surface temperature analyses using Optimum Interpolation. *Journal of Climate*, 7, 929-948.

Royer, J.-F. and co-authors, 2002: Simulation des changements climatiques au cours du XXI^e siècle incluant l'ozone stratosphérique. *C. R. Geoscience*, 334, 147-154.

Royer, J.-F., F. Chauvin, B. Timbal, P. Araspin and D. Grimal, 1998: A GCM study of the impact of greenhouse gas increase on the frequency of occurrence of tropical cyclones. *Climatic Change*, 38, 307-343.

Walsh, K., 1997: Objective detection of tropical cyclones in high-resolution analyses. *Monthly Weather Review*, 125, 1767-1779.