



HAL
open science

Effets des émissions anthropiques de gaz à effet de serre sur le climat du bassin de l’océan Indien

Benjamin Pohl, Pierre Camberlin

► **To cite this version:**

Benjamin Pohl, Pierre Camberlin. Effets des émissions anthropiques de gaz à effet de serre sur le climat du bassin de l’océan Indien. Journées de la Commission Climat et Sociétés, Mar 2005, Dijon, France. hal-00269117

HAL Id: hal-00269117

<https://hal.science/hal-00269117>

Submitted on 2 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Effets des émissions anthropiques de gaz à effet de serre
sur le climat du bassin de l'océan Indien**

B. POHL et P. CAMBERLIN

Centre de Recherches de Climatologie/Université de Bourgogne
6 Boulevard Gabriel – F-21000 Dijon – FRANCE

RESUME. La simulation numérique du climat par le modèle couplé de circulation générale ARPEGE-OPA est utilisée ici pour prédire les effets d'un doublement du CO₂ atmosphérique en l'an 2100 sur le climat du bassin de l'Océan Indien. Les températures de surface de la mer, les précipitations et les champs moyens de vents à 850 et 200 hPa sont étudiés au pas de temps trimestriel, sur les deux normales climatiques 1968-1997 et 2070-2099.

Pour la fin du XX^e siècle, le modèle a tendance à surestimer légèrement les TSM et plus fortement les précipitations, résultat d'un cycle hydrologique simulé trop développé. L'extraction d'indices pluviométriques calculés sur des régions homogènes montre que les téléconnexions entre ces deux paramètres sont également trop fortes.

Pour la fin du XXI^e siècle, un réchauffement de l'océan superficiel d'environ 2°C est prédit, tandis que les précipitations évoluent de manière contrastée selon la région considérée. Certaines évolutions non négligeables affectent aussi les téléconnexions concernant l'Afrique de l'Est durant le trimestre octobre-décembre ; une modification à long terme de la circulation zonale sur l'Océan Indien peut être évoquée afin d'expliquer ces changements.

MOTS-CLES. Simulation numérique du climat, températures de surface de la mer, téléconnexions, petite saison des pluies d'Afrique de l'Est, variabilité interannuelle.

1. Introduction et contexte

La simulation numérique du climat est utilisée pour estimer les possibles effets d'un doublement du CO₂ atmosphérique par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sur le climat du bassin de l'océan Indien. Bien que la tendance à la hausse des températures au cours du XXI^e siècle semble inéluctable et quasi-généralisée, avec une ampleur probablement comprise entre 1.4 et 5.8°C (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001), les conséquences du changement climatique global sur le champ de précipitations sont beaucoup moins bien connues et moins cohérentes spatialement. Cet état de fait s'avère tout particulièrement avéré pour la bande tropicale, où les projections des modèles divergent assez nettement selon les runs et les scénarios IPCC SRES (Special Report on Emissions Scenarios) d'émissions anthropiques de GES. La question du changement climatique et d'une éventuelle péjoration pluviométrique est d'une importance fondamentale dans les régions semi-arides caractérisées par un retard important dans leur développement économique et humain.

Avec une économie essentiellement agricole et un niveau de vie très faible, l'Afrique de l'Est équatoriale (Kenya-Tanzanie) se trouve très largement soumise à des crises récurrentes ayant pour origine les sécheresses (1984) ou les inondations (1981) néfastes à la pratique de

l'agriculture extensive ou à l'élevage. D'une manière plus générale, la variabilité climatique se pose souvent en ces régions en termes de potentialités agricoles, et les épisodes de disette et de famine ne sont toujours pas devenus une exception dans les régions bordières de l'océan Indien en ce début de XXI^e siècle.

Bien que situés à latitude égale, l'Afrique de l'Est et le Continent Maritime connaissent des conditions pluviométriques très dissemblables. Tandis que l'archipel indonésien apparaît assez uniformément arrosé tout au long de l'année, avec toutefois un léger maximum trimestriel pour octobre-décembre (OND), une organisation à deux saisons des pluies apparaît très nettement en Afrique de l'Est : les "Long Rains" de mars à mai et les "Short Rains" beaucoup moins abondantes d'octobre à décembre. Cette dissymétrie renvoie d'une part à la vitesse de déplacement latitudinal de la ZCIT, plus élevée dans le sens nord-sud en OND que dans le sens inverse en AMJ, et d'autre part au développement de conditions aérologiques de subsidence relative sur l'Afrique de l'Est en OND, couplées à une ascendance sur l'Indonésie (Black *et al.*, 2003).

Cette opposition zonale de façade est principalement gouvernée par une cellule de circulation atmosphérique indirecte de type Walker (Hastenrath, 2000). Bien que non décelable statistiquement de janvier à août, celle-ci est responsable des conditions ascendantes pluviogènes au-dessus de l'Indonésie, où elle jouxte la cellule directe Pacifique, pendant le trimestre OND. A l'opposé, la subsidence sur l'Afrique de l'Est est favorable au développement de conditions arides persistantes. Corrélativement, il est logique de retrouver une bande équatoriale n'excédant pas 10° de largeur, et marquée par une dominance de vents d'ouest de la surface jusqu'à environ 600 hPa (principalement en avril-mai et octobre-novembre). La branche altitudinale est de direction dominante d'est en OND seulement, et est assez variable le reste de l'année.

Le moteur énergétique de cette circulation est le gradient zonal de température de surface de la mer ("TSM") qui apparaît plus ou moins fortement selon la saison aux latitudes équatoriales, et qui confère en général à l'est du bassin des TSM supérieures de 0.5 à 2°C par rapport à l'ouest. L'amplitude de ce gradient connaît un cycle annuel qui, même s'il est tributaire d'une variabilité interannuelle non négligeable, minimise l'écart de température d'une manière récurrente durant le bimestre septembre-octobre (Black *et al.*, 2003, Webster *et al.*, 1999). Ce qui peut permettre à une anomalie de TSM mineure, survenant à cette période de l'année, d'inverser potentiellement le sens du gradient ; la variabilité interannuelle des TSM, maximale à ce trimestre et spatialement très cohérente, joue également dans ce sens. Ces phénomènes peuvent entraîner des anomalies majeures de la circulation atmosphérique, en particulier de la convection zonale dont le gradient thermique est le principal moteur énergétique.

Durant le trimestre OND la sensibilité des champs climatiques (TSM et circulation atmosphérique associée) aux modes de variabilité dominants aux pas de temps interannuel -El Niño Southern Oscillation (ENSO) ou Dipole Mode (Saji *et al.*, 1999)- est donc accrue à l'échelle du bassin océanique dans son ensemble. Ce résultat est également transposable à l'échelle plus restreinte de l'Afrique de l'Est.

De nombreuses études ont déjà été menées sur la thématique de la variabilité pluviométrique interannuelle dans le bassin de l'Océan Indien, notamment celle des Short Rains d'Afrique de l'Est (Beltrando, 1990, Beltrando et Cadet, 1990, Rowell *et al.*, 1994). La petite saison des pluies présente en effet de fortes corrélations positives (significatives au

seuil de 98% par le test de Bravais-Pearson) avec les TSM de l'ouest du bassin océanique. Elle est également caractérisée par une importante variabilité interannuelle (Beltrando, 1990). Cette variabilité est notamment à l'origine d'un cumul trimestriel de pluies équivalent à celui des Long Rains une année sur quatre environ.

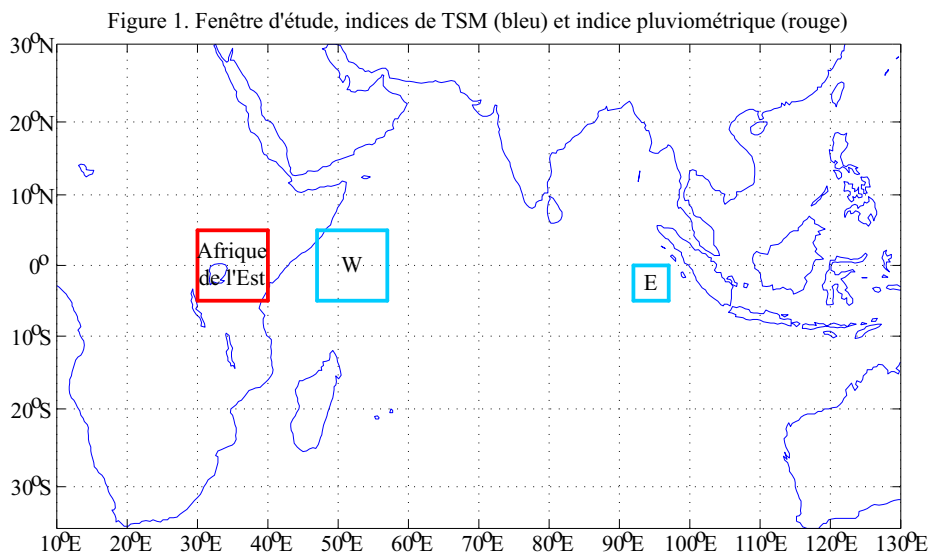
L'analyse des données de vents et des TSM permet d'apporter quelques éléments explicatifs, puisqu'un affaiblissement, voire un renversement, de la cellule de Walker (causé par un affaiblissement du gradient est-ouest de TSM en septembre-octobre comme décrit ci-dessus) sur l'Océan Indien est observable les années marquées par un excédent pluviométrique sur l'Afrique de l'Est à cette saison (Camberlin *et al.*, 2002, Ogallo, 1989, Webster *et al.*, 1999). Les TSM sur l'ouest du bassin connaissent alors de fortes anomalies positives, tandis que les vents équatoriaux sont en toute logique marqués par des anomalies d'est. Et, à l'opposé, l'est du bassin est en général anormalement frais, ce qui tend à créer des conditions particulières de subsidence et de sécheresse en Indonésie (Camberlin *et al.*, 2002). Cette conjonction de facteurs, couplée à l'advection d'humidité par les alizés situés entre 10 et 15°S, est favorable à une ascendance d'air anormalement développée en Afrique de l'Est ainsi qu'à une stagnation de l'humidité sur place (alors qu'elle est habituellement évacuée vers l'océan par les vents d'ouest équatoriaux, Black *et al.*, 2003).

Le présent travail se propose finalement d'étudier l'évolution des champs moyens gouvernant les cumuls pluviométriques d'OND sur l'Afrique de l'Est, ainsi que leur variabilité interannuelle, dans la perspective du changement climatique global d'origine anthropique.

2. Données et méthodes

La région d'étude est le bassin de l'océan Indien "élargi" aux terres voisines (figure 1).

a) Données d'observation



Les données de TSM retenues sont la version 2.3 du fichier GISST (Global sea Ice and Sea Surface Temperature) du Hadley Centre, UKMO, qui met à disposition sur la période 1871-aujourd'hui des données mensuelles analysées de TSM sur une grille de 1°

x 1°. Le fichier du CRU fournit, sur la période 1900-1998, des cumuls mensuels de précipitations pour les terres émergées sur une grille de 2.5° de latitude par 3.75° de longitude.

b) Le modèle ARPEGE-OPA

Les résultats présentés dans ce travail, en ce qui concerne l'ensemble de l'aspect prospectif, exploitent les sorties du modèle global couplé océan-atmosphère (GCM) ARPEGE-OPA du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Toulouse. Dans la version utilisée pour cette expérience, la résolution horizontale du modèle est fixe, les points de grille mesurant $2^{\circ}79$ de latitude et $2^{\circ}8125$ de longitude (soit une grille linéaire gaussienne 128×64 , à troncature T63) ; la précision verticale est de 45 niveaux répartis entre la surface (1000 hPa) et la haute troposphère. Les calculs sont effectués sans ajustement des flux, et prennent en compte les rétroactions existant entre glaces, océans, terres émergées et atmosphère ; seules les rétroactions avec la végétation ne sont pas modélisées.

Deux expériences réalisées sur ARPEGE-OPA sont utilisées (sg0 et ct0). L'expérience sg0 est forcée par le scénario d'émission de GES SRES B2. L'expérience de contrôle ct0 menée dans des conditions de stabilité de la composition chimique atmosphérique (celle de 1950), permet de déceler en parallèle d'éventuelles dérives internes au modèle, les runs étant menés sans ajustement des flux. Les sorties de modèle sont disponibles sur la période 1950-2099. Bien qu'une période de calage de 20 ans ait été prévue initialement, pour permettre au GCM d'atteindre l'équilibre et de générer sa propre variabilité interne indépendamment des conditions initiales, il a été choisi de ne pas commencer l'étude avant la fin des années 1960.

Les variables analysées sont traitées au pas de temps trimestriel (JFM, AMJ, JAS, OND), ce qui permet de réduire la masse de données tout en continuant à décrire de manière convenable le cycle annuel sur le fuseau indien. Sont finalement exploités : les températures moyennes de surface, les précipitations journalières moyennées par trimestre, et les vents simulés à l'altitude 850 hPa et 200 hPa.

Le présent travail procède systématiquement en 2 phases, afin de tester la robustesse des résultats présentés :

1. Comparaison de la simulation du climat actuel avec les données d'observation.
2. Analyse de la normale "future", 2070-2099.

3. Résultats

Les données de pluviométrie des années antérieures à 1968 sont considérées comme peu fiables (Camberlin et Philippon, 2002) et ne permettent pas de laisser au GCM le temps de générer ses conditions internes en situation d'équilibre dynamique indépendamment des forçages initiaux. Et les années postérieures à 1997 connaissent de nombreux manques dans les observations.

L'étude compare par conséquent la normale 2070-2099 à la normale climatique 1968-1997.

a) Simulation du climat actuel

La figure 2 représente le champ de TSM tel qu'il est simulé par ARPEGE-OPA sur la période 1968-1997. La zonalité de la distribution des TSM de l'Océan Indien ressort clairement, mais il convient aussi de noter l'opposition de façade est-ouest dont il a été fait état précédemment. Enfin, les températures de l'océan sont chaudes et semblent soumises à un cycle thermique annuel d'amplitude très modérée ; ce constat a été effectué de longue date et peut être retrouvé dans de très nombreux articles de climatologie. Fondamentalement les TSM

Figure 2. TSM observées 1968-1997

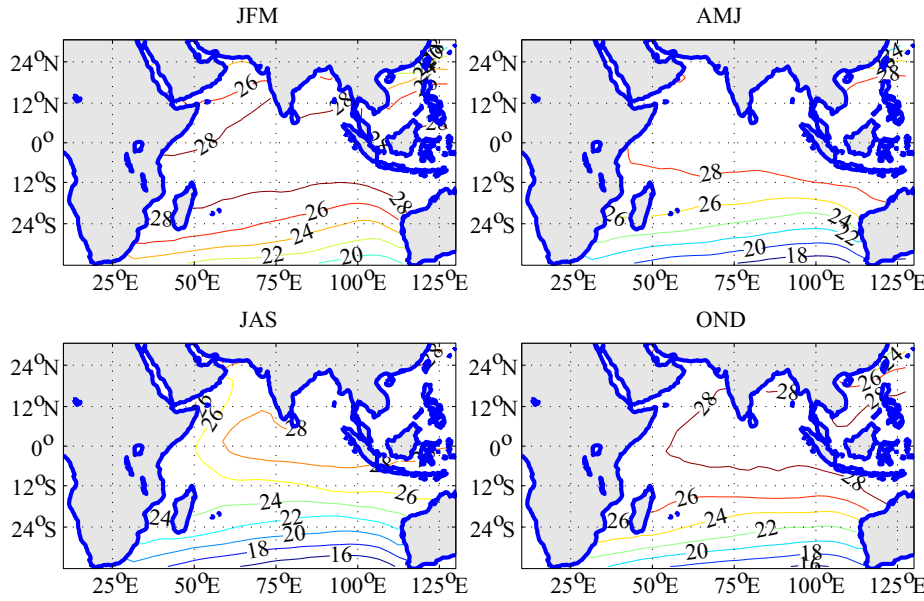
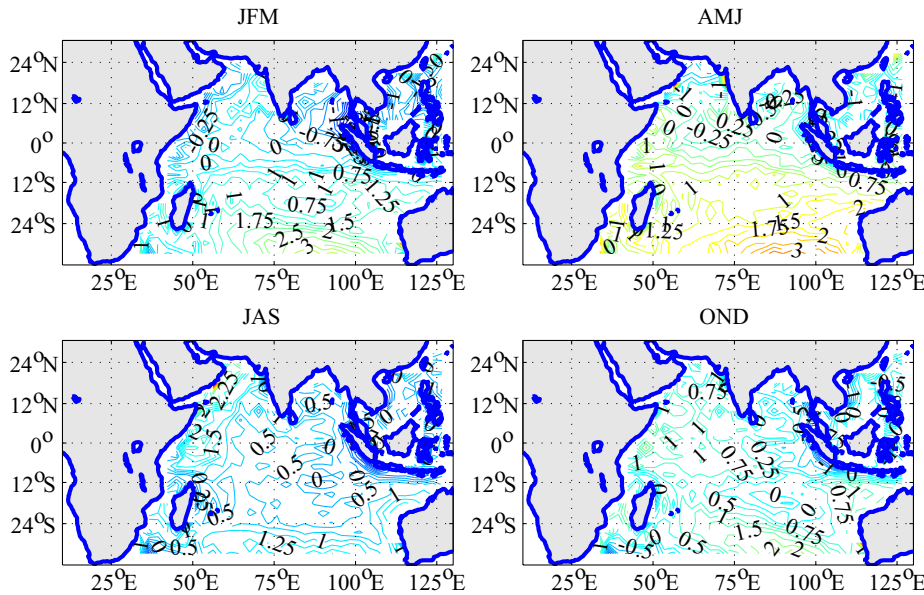


Figure 3. Ecart des TSM ARPEGE aux observations - 1968-1997



apparaissent particulièrement surestimées (écarts supérieurs à $+2^{\circ}\text{C}$ par endroits). Au contraire, la zone équatoriale notamment à l'est de la fenêtre d'étude semble mieux modélisée.

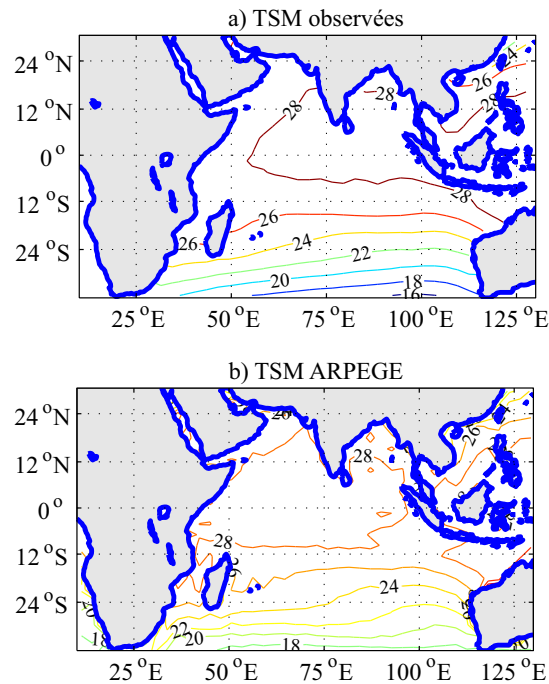
Cette distribution des anomalies soulève le problème de la retranscription de l'opposition zonale de façade : si le modèle est anormalement chaud sur l'ouest de l'océan, le gradient thermique et par conséquent la circulation atmosphérique zonale seront affectés et probablement significativement sous-estimés et altérés. Le gradient thermique dans le GCM est même, en moyenne, inversé le long de l'équateur par rapport à l'observation, en OND notamment (figure 4).

du modèle correspondent donc aux observations réalisées et aux climatologies assez bien connues de l'océan Indien.

La figure 3 présente les écarts du modèle à la réalité sur la période "actuelle" 1968-1997.

Il apparaît tout d'abord que le GCM simule des températures de surface généralement trop élevées sur la fenêtre d'étude : rares y sont en effet les écarts de signe négatif, traduisant des TSM sous-estimées. Les températures des latitudes extratropicales australes (principalement de janvier à juin) ainsi que celles de la façade ouest du bassin (surtout de juillet à décembre)

Figure 4. TSM OND 1968-1997



La même démarche effectuée sur les champs de précipitations (non montré), révèle :

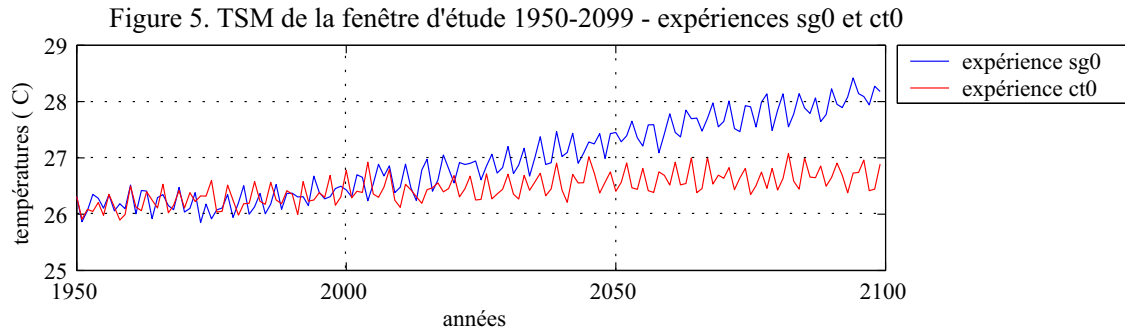
- (i) une surestimation assez importante des précipitations notamment sur les continents. Cet état de fait résulte d'un cycle hydrologique trop développé dans le modèle.
- (ii) une retranscription correcte des régimes pluviométriques moyens, permise par une simulation assez fidèle de la migration latitudinale de la ZCIT au cours du cycle annuel.
- (iii) plus localement, une surestimation non négligeable des pluies d'OND en Afrique de l'Est en lien avec une sous-estimation des cumuls trimestriels correspondant en Indonésie (Sumatra et Java). Les biais notés dans la retranscription de l'opposition pluviométrique zonale entre les façades du bassin Indien résultent en fait des défauts précédemment notés quant au gradient zonal de TSM à l'équateur, ce dernier générant à son tour une cellule de Walker indienne anormalement faible.

BILAN. Le modèle ARPEGE-OPA est ainsi caractérisé :

- (i) par une relative surestimation des températures de surface marine à l'échelle du bassin océanique Indien, et plus particulièrement au large de la côte d'Afrique de l'Est.
- (ii) en conséquence, une cellule de Walker affaiblie apportant des précipitations trop importantes sur l'est de l'Afrique et trop faibles sur l'ouest du Continent Maritime.

b) Evolution des champs moyens au cours du XXI^e siècle

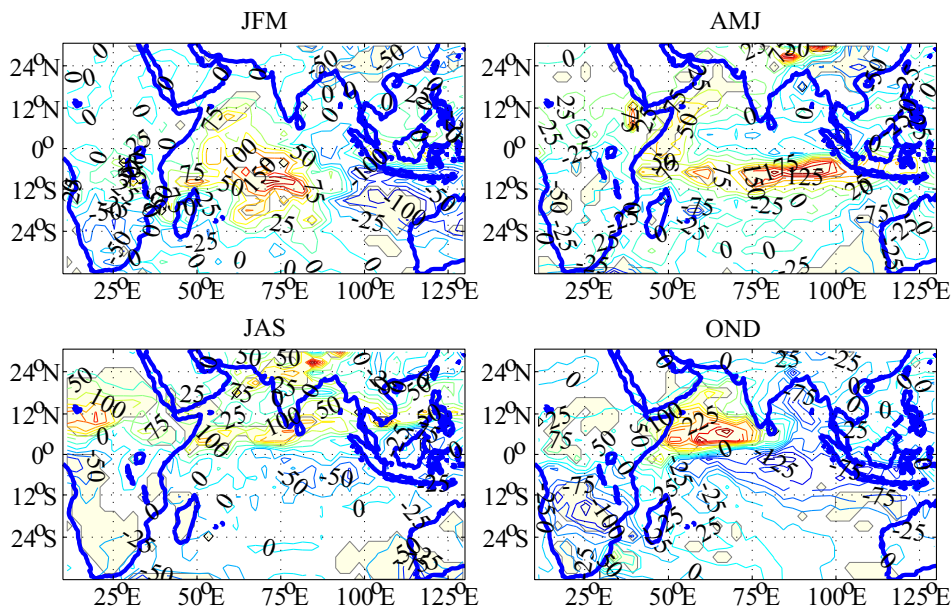
Le modèle étant a priori capable de restituer d'une manière relativement satisfaisante les conditions climatiques actuelles, l'analyse des sorties concernant l'ensemble du XXI^e siècle pourra être menée en accordant une confiance relative aux résultats obtenus. Dans cette partie, les deux expériences sg0 (forcée par le scénario SRES B2) et ct0 (contrôle) seront considérées tour à tour afin d'estimer la part du signal climatique lié aux émissions de GES et la dérive temporelle du modèle de circulation générale.



La dérive des températures (ici, les TSM, fig. 5) d'un modèle dans le temps peut, d'un run à l'autre, grandement perturber l'appréciation du signal climatique dans un modèle couplé sans ajustement des flux. Dans le cas présent, l'expérience de contrôle ct0 présente une dérive positive d'environ $+0.5^{\circ}\text{C}$ sur 150 ans. A comparer à cette valeur, l'expérience sg0 (scénario SRES B2) présente un réchauffement de l'océan superficiel d'environ $+2^{\circ}\text{C}$. Même si une dérive non négligeable est observée (25% du réchauffement lui étant imputable), un signal climatique associé aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre est néanmoins clairement perceptible.

Si le réchauffement de l'océan Indien superficiel est quasi-généralisé, bien qu'une nouvelle fois supérieur sur l'ouest du bassin et aux latitudes équatoriales (non montré), l'évolution des précipitations s'avère beaucoup plus contrastée. La figure 6 présente l'évolution simulée des précipitations entre les deux normales 1968-1997 et 2070-2099. Les changements significatifs

Figure 6. Différence (mm) de précipitations 2070-2099 - 1968-1997



au seuil de 98 % selon le test de Student ont été indiqués (jaune pâle).

D'une manière générale les tendances à la hausse des précipitations (rouge) sont essentiellement observées aux latitudes du front intertropical quelle que soit la saison. Ce résultat peut être interprété comme un

renforcement de la circulation de Hadley et de la convergence des alizés dans les basses couches. Parallèlement les évolutions à la baisse des précipitations dans les deux hémisphères météorologiques sont à relier au renforcement des alizés et à l'assèchement des premières couches de l'atmosphère, toujours en lien avec un écoulement plus important et/ou plus rapide de l'air. Cette observation prévaut tout au long du cycle annuel.

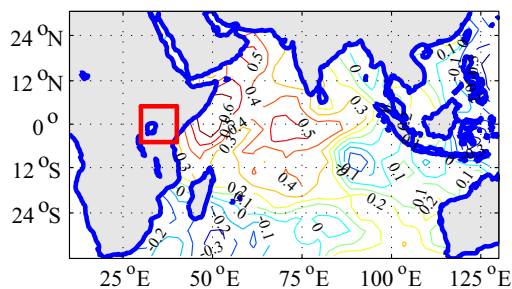
Cependant, pour OND et dans une moindre mesure pour JFM, une opposition zonale est à nouveau observable, et la hausse des précipitations au cours du siècle n'est plus circonscrite qu'à la moitié occidentale du bassin océanique. Ce signal pourrait être compatible avec un affaiblissement de la circulation de Walker indienne, spatialement cohérente pour la seule saison d'automne boréal (Hastenrath, 2000), et responsable des conditions de subsidence (resp. d'ascendance) observées en moyenne au-dessus de l'Afrique de l'Est équatoriale (resp. du Continent Maritime). Au cours du XXI^e siècle selon les simulations du modèle, tout se passe donc comme si cette cellule de circulation zonale devait s'affaiblir graduellement, et de fait générer à l'horizon 2100 une opposition de façade moins marquée d'un point de vue pluviométrique par rapport à la situation actuelle.

BILAN. Vers une hausse des TSM de l'ordre de +2°C sur l'ensemble du bassin, et une circulation de Hadley amplifiée. Une opposition de façade moins marquée aux latitudes équatoriales correspondant à une cellule zonale de Walker affaiblie.

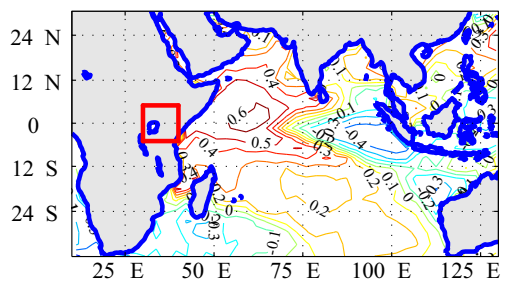
c) Evolution de la variabilité interannuelle des pluies d'OND en Afrique de l'Est

Figure 7. Téléconnexions précipitations OND Afrique de l'Est - TSM

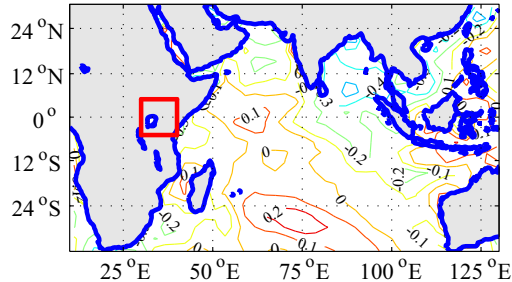
a) Corrélations TSM-précipitations observées, 1968-1997



b) Corrélations TSM-précipitations ARPEGE, 1968-1997



c) Corrélations TSM-précipitations ARPEGE, 2070-2099



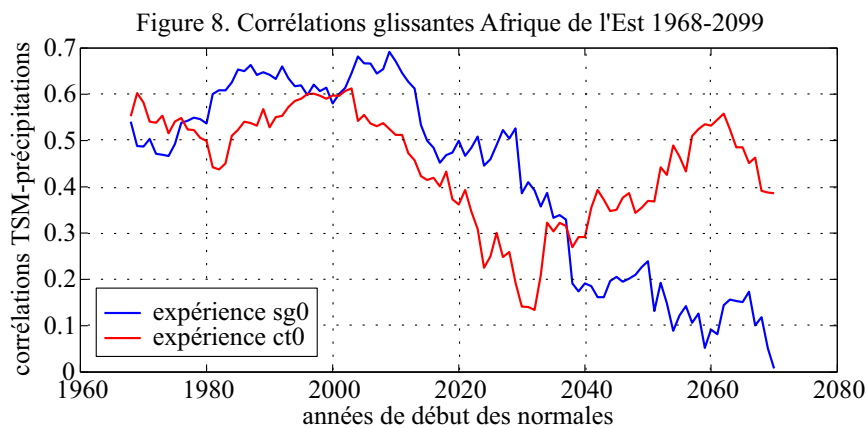
En raison de son retard de développement, des conditions semi-arides qui y prévalent et de sa forte dépendance à la ressource en eau, l'Afrique de l'Est équatoriale sera plus particulièrement étudiée dans la suite de cette étude. Les téléconnexions observées entre l'Afrique de l'Est et l'océan Indien en OND ont déjà été abondamment étudiées (Beltrando et Cadet, 1990, Black *et al.*, 2003, Mutai *et al.*, 1998, Rowell *et al.*, 1994). Les observations (fichier pluviométrique CRU et données de TSM GIST, fig. 7a) permettent de retrouver la zone de corrélations significatives (test de Bravais-Pearson, 98%) positives sur l'ouest du bassin, au large des côtes africaines. Les coefficients de corrélation dépassant 0.6, près de 40 % de la variance des pluies sont ainsi expliqués par les variations des TSM de cette région. Au large des côtes indonésiennes en revanche la significativité n'est pas atteinte, ce qui ne permet pas de parler d'un dipôle zonal sur l'océan Indien équatorial.

ARPEGE-OPA reproduit de manière très fidèle cet ensemble sur l'ouest du bassin pour la normale climatique "actuelle" (figure 7b), mais il simule des téléconnexions négatives trop importantes en valeur absolue sur l'est de l'océan aux latitudes équatoriales. Cette dernière zone est cependant d'extension spatiale très limitée, et $|r|$ ne dépasse pas 0.4 ; la reproduction des téléconnexions pour l'Afrique de l'Est en OND est par conséquent jugée très satisfaisante d'une manière générale. Ainsi, le modèle a certes tendance à sous-estimer voire à inverser le gradient thermique entre l'est et l'ouest,

mais il a au contraire tendance à surestimer les effets que sa variabilité peut engendrer sur celle des précipitations au pas de temps interannuel.

Remarquons par ailleurs qu'en 1997, année quasiment la plus pluvieuse du siècle en Afrique de l'Est, les TSM présentait une configuration spatiale très proche de celle des corrélations simulées pour 1968-1997 par le GCM (fort réchauffement de l'ouest du bassin, rafraîchissement de l'est par un phénomène d'upwelling anormalement développé le long des côtes de Sumatra). Ce qui laisse penser que le modèle est a priori capable de reproduire les événements "dipole mode" (Saji *et al.*, 1999) extrêmes avec une grande fidélité.

La simulation des téléconnexions pour la normale 2070-2099 présente toutefois des bouleversements importants par rapport à la situation actuelle (fig. 7c). On note la totale disparition des corrélations linéaires significatives (qu'elles soient positives ou négatives) sur l'ensemble du bassin de l'Océan Indien. Le nuage de points croisant indices de TSM et précipitations (non montré) permet de conclure à une baisse de l'influence des TSM sur les "Short Rains" d'Afrique de l'Est, et non à une modification de la nature linéaire de la relation statistique liant les températures de l'océan aux précipitations au cours du temps.



La figure 8 présente les corrélations glissantes entre TSM sur l'ouest du bassin (indice W, reporté sur la figure 1) et les précipitations d'OND en Afrique de l'Est sur une fenêtre temporelle mobile de 30 ans et sur la période 1950-2100. Tandis que les corrélations ct0 sont

soumises à des fluctuations inter-décennales non négligeables, une tendance à la baisse des corrélations sg0 est clairement identifiable dès la fin des années 2010, et permet de conforter l'idée selon laquelle la perte de significativité des relations linéaires est structurelle et durable, et non conjoncturelle et momentanée car causée par quelques années exceptionnelles non représentatives des conditions de fond du système climatique.

Rappelons qu'il s'agit là des résultats d'une seule expérience, réalisée sur un seul GCM, et que par conséquent ils doivent être relativisés ; mais la non pérennisation de ces liens, qui constituent un aspect fondamental des mécanismes thermodynamiques du bassin indien, risque néanmoins d'être lourde de conséquences pour le climat futur et pour les activités anthropiques qui en sont dépendantes.

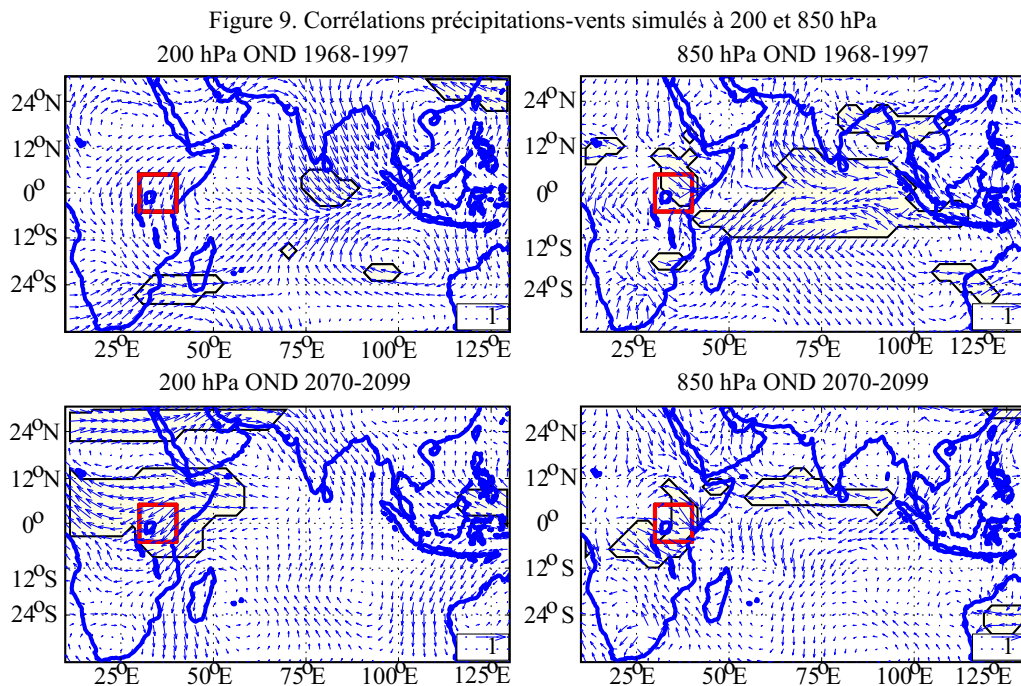
BILAN. L'expérience sg0 simule un changement important de l'intensité des téléconnexions entre les TSM et les précipitations en Afrique de l'Est durant le trimestre OND. L'hypothèse qui peut être formulée est que les mécanismes qui en sont responsables font intervenir la cellule de Walker indienne et le gradient thermique zonal.

d) Vers une modification de la circulation de Walker indienne ?

Les données de vents d'ARPEGE-OPA à 850 hPa et 200 hPa sont ici utilisées, conjointement aux températures et aux précipitations simulées, et moyennées sur OND pour

les deux normales climatiques de référence. Elles permettent de rendre compte de manière synthétique et relativement précise de la dynamique de la basse et de la haute troposphère.

Les champs moyens simulés pour les deux normales 1968-1997 et 2070-2099 semblent de prime abord soumis à des évolutions très faibles (non montré). Sur l'océan Indien central, des vents d'ouest équatoriaux apparaissent nettement en 1968-1997 conformément aux résultats de Hastenrath (2000) ; leur extension spatiale se réduit à une très petite zone à l'ouest du soixantième méridien est en 2070-2099. La force des vents est de plus sous-estimée par rapport à l'observation, du fait de l'inversion du gradient de TSM au sein du modèle, dont il a été fait état précédemment. Il peut même sembler surprenant que le GCM simule des vents de sens opposé à celui du gradient thermique moyen ; la retranscription de la dynamique atmosphérique liée à la circulation zonale doit probablement en être la cause principale.



Les vents simulés pour chaque point de grille sont ensuite corrélés avec les précipitations trimestrielles de l'indice pluviométrique d'Afrique de l'Est pour les deux normales (fig. 9). Les corrélations significatives au seuil de 98% par le test de Bravais-Pearson ont été coloriées. A 850 hPa, en 1968-1997, des anomalies positives de précipitations sur l'Afrique de l'Est en OND sont accompagnées d'anomalies de vents d'est sur l'Océan Indien équatorial ; ces corrélations sont significatives sur une large partie du bassin surtout aux faibles latitudes australes. Ce qui traduit en fait un affaiblissement voire un renversement de la cellule de Walker indienne, et des vents d'ouest de surface qui lui sont associés (Webster *et al.*, 1999). Par ailleurs un surplus de précipitations est accompagné de vents d'ouest anormalement forts sur le continent africain, à l'intérieur des terres, qui peuvent contribuer à l'ascendance des vents océaniques en créant ainsi une convergence au-dessus des massifs montagneux de l'est du continent. Ces vents peuvent aussi advecter de l'humidité depuis le bassin du Congo (Pohl et Camberlin, 2005).

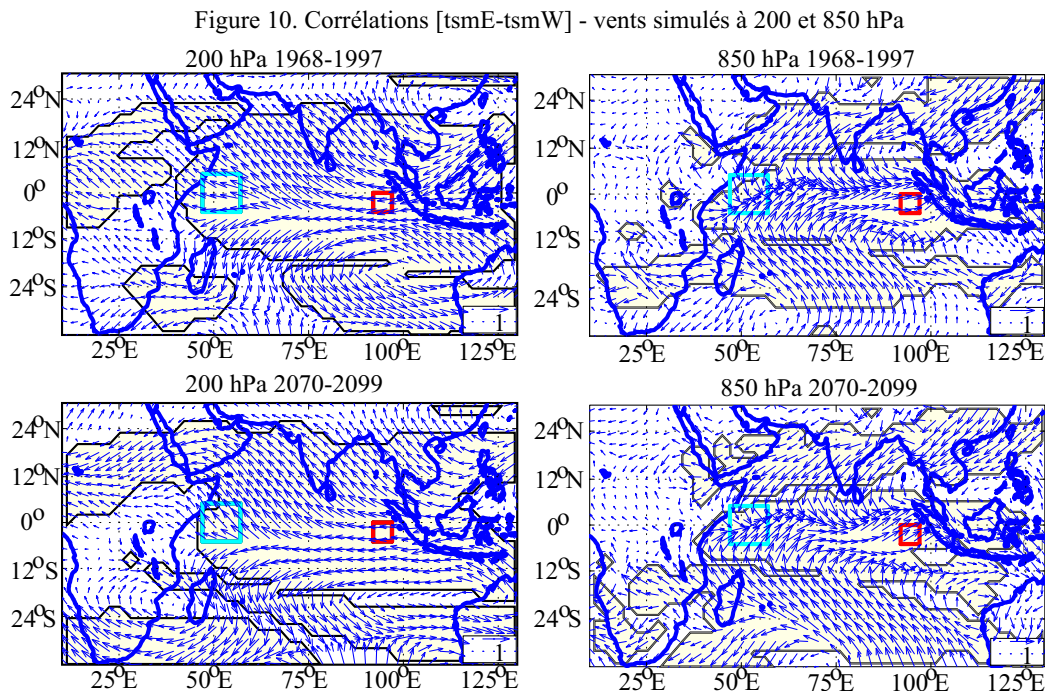
En 2070-2099, ces anomalies d'ouest se sont étendues spatialement sur l'est du continent africain ; mais les anomalies d'est sur l'océan ont au contraire très nettement décliné, traduisant une perte d'importance des vents équatoriaux, branche inférieure de la cellule de Walker, dans les épisodes les plus arrosés. Les corrélations significatives ne sont plus situées

qu'entre le sud de la péninsule indienne et l'équateur, l'hémisphère austral ayant totalement perdu sa prédominance.

D'importantes modifications surviennent également à l'altitude 200 hPa, puisque les anomalies d'ouest au sud de l'Inde (pouvant être interprétées comme un affaiblissement de la branche d'altitude de la cellule de Walker lors de précipitations anormalement abondantes sur l'Afrique de l'Est) ont totalement disparu en 2070-2099. Des anomalies d'est couvrent en revanche une large zone sur l'ensemble du continent africain, de 0 à 12°N : elles pourraient traduire un renforcement de l'influence de la cellule de Walker africaine sur la pluviométrie de la partie équatoriale orientale du continent. Une telle hypothèse est compatible avec le renforcement des anomalies d'ouest sur l'Afrique à 850 hPa.

Les changements survenus, relatifs aux corrélations entre TSM et précipitations d'une part, et vents et précipitations d'autre part, laissent penser à un affaiblissement de la cellule de Walker indienne, ou du moins à une baisse de son impact sur la pluviométrie est-africaine. Afin de mettre à jour l'évolution de la dynamique atmosphérique de cette région, les corrélations entre le gradient thermique zonal de températures de surface indiennes et les vents simulés à 850 et à 200 hPa sont calculées.

Le gradient de températures est obtenu en extrayant les TSM sur l'est et sur l'ouest du bassin, dans les boîtes 0-5°S 92-97°E ("E") et 5°N-5°S 47-57°E ("W") : cf. fig. 1. Ces cadres sont en accord avec ceux que Saji *et al* (1999) et Black *et al* (2003) ont utilisés pour étudier les événements "dipole mode" de l'Océan Indien en OND. La différence "TSM E – TSM W" est ensuite calculée, puis corrélée aux champs de vents (fig. 10). Les corrélations significatives à 98 % ont été coloriées.



Très peu de changements interviennent entre la fin du XX^e et la fin du XXI^e siècle. Une forte amplitude du gradient, c'est-à-dire une différence de température très positive entre l'est et l'ouest, est accompagnée d'anomalies de vents d'ouest le long de l'équateur à 850 hPa et d'anomalies d'est à 200 hPa. Ceci signifie qu'un fort gradient de températures de surface de la mer est accompagné d'une circulation de Walker plus forte que la normale. Les bornes

longitudinales de la cellule indienne ne semblent pas se déplacer, et les limites latitudinales de la zone concernée par cette circulation de part et d'autre de l'équateur paraissent également stables. Il est toutefois possible que cette stabilité apparente soit provoquée par le choix des indices de TSM, eux-mêmes inchangés d'une période à l'autre, et qui pourraient ne pas retranscrire d'une manière probante un éventuel déplacement des deux pôles du "dipole mode".

Les corrélations significatives s'étendent toutefois à une large partie du bassin océanique, et il est intéressant de constater que l'amplitude du gradient est positivement corrélée avec la force des alizés au-dessus de l'Océan Indien dans les deux hémisphères géographiques. A 200 hPa un fort gradient génère un fort flux d'est aux latitudes tropicales nord et sud, à l'exception du sud-est du bassin et de l'Australie.

BILAN. La circulation de Walker ne semble donc concernée par aucune évolution majeure entre 1968-1997 et 2070-2099. Ce qui implique que les changements survenus au niveau des téléconnexions TSM-précipitations pour l'Afrique de l'Est en OND ne sont pas générés directement par un bouleversement touchant la cellule de circulation zonale.

e) Vers une modification des téléconnexions ?

L'indépendance statistique entre les TSM de l'ouest du bassin et l'indice pluviométrique est-africain implique une baisse de l'influence de la circulation de Walker sur les "Short Rains" de cette région, d'une normale à l'autre. La partie suivante va s'attacher à vérifier cette hypothèse.

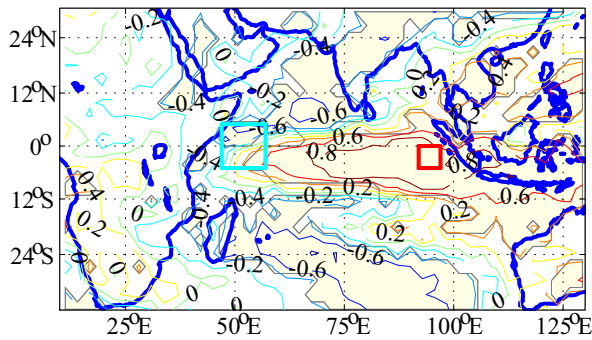
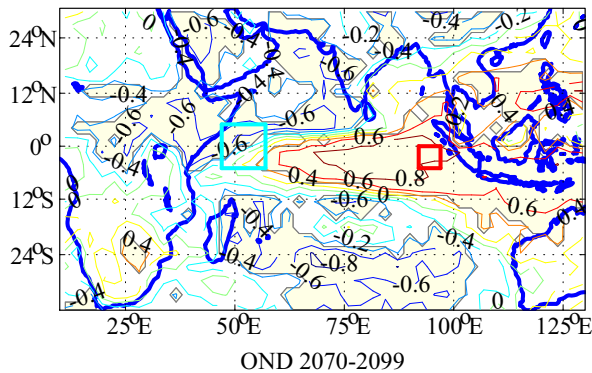
Le raisonnement tenu est le suivant :

1. On constate une baisse des corrélations TSM-précipitations en OND.
2. Les corrélations entre vents équatoriaux et précipitations perdent également en intensité.
3. Or la circulation cellulaire zonale indienne reste fortement dépendante de l'opposition thermique de façade est-ouest.
4. Conclusion : les précipitations sont donc moins directement dépendantes de la circulation zonale, mais celle-ci reste fondamentalement gouvernée par les mêmes phénomènes thermiques.

Pour les deux périodes d'étude, on réalise les cartes de corrélation entre les précipitations simulées et l'amplitude du gradient thermique zonal durant le trimestre OND (fig. 11). Ces cartes doivent permettre de montrer, grâce aux indices thermiques (donc indirectement), l'influence de la circulation de Walker sur les cumuls précipités, dans l'ensemble de la fenêtre d'étude.

En toute logique, on retrouve pour 1968-1997 une opposition assez marquée, isolant les corrélations négatives de l'ouest (zone africaine) à celles positives de l'est (zone indonésienne). Une inflexion des lignes d'isocorrélations le long de l'équateur témoigne clairement de l'extension spatiale de la cellule de Walker elle-même. Cette distribution spatiale renvoie à une situation bien connue et abondamment décrite et étudiée, dans laquelle la subsidence sur l'ouest de l'Océan Indien, plus puissante si les eaux sont anormalement chaudes à l'est et fraîches à l'ouest, est responsable des faibles précipitations de la région. A l'inverse, l'ascendance sur l'est génère de fortes pluies, surtout lorsque le gradient est important ; l'aire concernée par ce surplus de précipitations le long de l'équateur s'étend

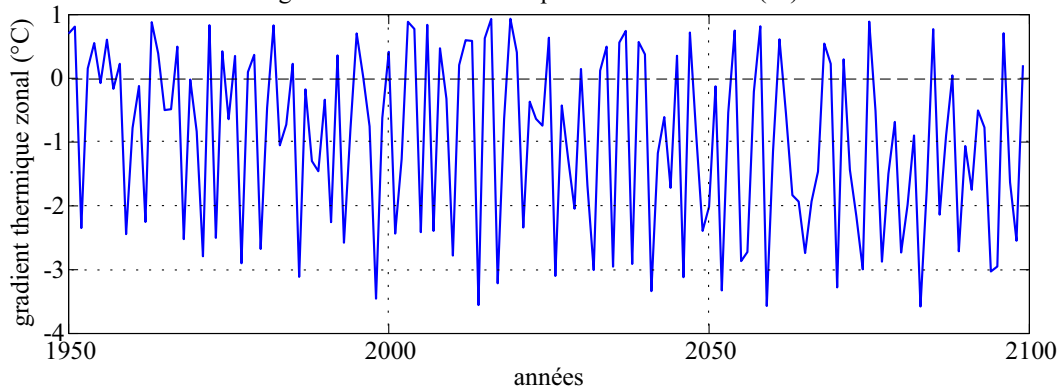
Figure 11. Corrélations [tsmE-tsmW] - précipitations simulées
OND 1968-1997



largement vers l'ouest du bassin, jusqu'au 65° méridien est environ. Dans l'espace retenu pour former l'indice pluviométrique est-africain, les corrélations sont alors centrées sur l'isoligne -0.6.

La situation évolue relativement peu à l'échelle du bassin en 2070-2099. La configuration obtenue demeure quasiment identique, surtout sur l'est du bassin où les corrélations positives ne perdent pas en intensité. Sur l'Afrique, on note cependant une baisse importante de leur force : la zone de l'indice pluviométrique se trouve désormais de part et d'autre de l'isoligne -0.2, ce qui indique une perte de la significativité de la relation. D'une manière plus générale, toutes les corrélations négatives à proximité de l'Afrique équatoriale orientale semblent affectées. Il semble donc que l'intensité de la branche subsidente de la cellule de Walker (cette dernière toujours étroitement liée au gradient de TSM équatorial) n'ait plus d'influence forte sur les quantités d'eau précipitées sur l'Afrique de l'Est durant le trimestre OND. Tandis que son aire d'influence s'étendait sur l'intérieur des terres africaines pour la normale de la fin du XX^e siècle, celle-ci ne se trouve plus restreinte qu'au seul domaine océanique à la fin du XXI^e siècle. Une nouvelle fois, les corrélations glissantes (figure 8) semblent indiquer que cette modification s'avère permanente et non le résultat d'années hors normes.

Figure 12. Gradient thermique zonal 1950-2099 (°C)



Enfin, la légère tendance à la baisse du gradient thermique zonal de TSM à l'équateur (figure 12) peut permettre d'expliquer en partie l'apparente atténuation de l'opposition zonale de précipitations notée à la figure 6. Pour la fin du XXI^e siècle, les années caractérisées par des affaiblissements voire des inversions du gradient thermique zonal et de la circulation cellulaire zonale qui lui est associée semblent donc devoir devenir plus fréquentes ou plus marquées. Tout se passe finalement comme si la signature typique des années ENSO ou "dipole mode" devait être observée d'une manière plus marquée et/ou plus récurrente.

BILAN. Vers une circulation de Walker en moyenne affaiblie mais dont la variabilité interannuelle ne semble plus gouverner de manière déterminante celle des cumuls pluviométriques d'OND en Afrique de l'Est.

Conclusion

Le modèle de circulation générale ARPEGE-OPA simule, pour la période actuelle, des températures de surface de la mer globalement trop élevées de 0.25 à 0.75°C sur la fenêtre de l'Océan Indien. Ses écarts par rapport à la réalité ne sont pas homogènes spatialement, ce qui entraîne notamment une altération significative de la reproduction du gradient thermique zonal équatorial dans ce bassin, et donc de la circulation atmosphérique cellulaire qui lui est associée. Le cycle hydrologique simulé est par ailleurs largement surestimé, et les précipitations (surtout continentales) qui en résultent connaissent de ce fait un biais systématique dans les régions équatoriales de l'Afrique de l'Est et du Continent Maritime.

Selon une expérience menée conformément au scénario SRES B2, prévoyant un quasi-doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique pour l'an 2100, ARPEGE-OPA prévoit une hausse de 2°C environ des moyennes annuelles des TSM indiennes en 150 ans ; 0.5°C environ sont imputables à une dérive du modèle au cours du temps. Cette expérience simule en parallèle une hausse modérée des précipitations à l'échelle de la fenêtre d'étude, mais le bilan est plus nuancé aux échelles plus fines. D'une manière générale, on peut noter une amplification apparente de la circulation de Hadley mais un affaiblissement relatif de la circulation de Walker, particulièrement durant le trimestre OND.

L'étude de la variabilité interannuelle des cumuls précipités est permise par l'analyse détaillée des téléconnexions entre les TSM de l'Océan Indien et d'un indice pluviométrique régional est-africain calculé sur une région a priori homogène. L'évolution simulée de ces relations, amène à conclure à une disparition totale et durable des corrélations positives significatives existant actuellement entre les TSM de l'ouest du bassin et la variabilité interannuelle des "Short Rains". L'analyse conjointe des données de vents simulés à 850 et 200 hPa permet de vérifier la pérennisation de la cellule de Walker indienne, générée par le gradient thermique zonal équatorial sur cet océan, malgré son affaiblissement très modéré, en valeur moyenne, sur 30 ans. Son influence sur les précipitations africaines semble en revanche décroître significativement. Tout se passe donc comme si la branche subsidente occidentale de la cellule zonale indienne perdait en cohérence et en force.

Ces résultats ne sont cependant obtenus que par l'analyse approfondie d'une expérience unique, menée sous un modèle couplé océan-atmosphère unique, et selon un scénario d'émission de gaz à effet de serre précis. La prise en compte de plusieurs expériences, menées selon divers scénarios et si possible sur plusieurs modèles numériques de climat, serait dès lors nécessaire pour confirmer ou au contraire pour relativiser l'évolution dont il a été fait état. Par ailleurs, une investigation poussée des mécanismes liant les différents éléments constitutifs de la cellule de Walker indienne aux précipitations sur l'Afrique de l'Est pourrait permettre d'affiner les hypothèses d'évolution future, en se basant sur une situation actuelle mieux connue.

Les incidences sociétales des changements prévus, qui restent l'un des aspects les plus fondamentaux de la recherche en climatologie, demeurent malgré tout extrêmement difficiles à prévoir et à anticiper. La variabilité temporelle des "Short Rains" semble en effet assez peu

affectée, en terme d'écart type, par l'évolution des mécanismes gouvernant ces écarts d'une année sur l'autre. Mais la disparition de la structure d'ordre marquée, actuellement à l'origine de ces variations climatiques interannuelles, risque très probablement d'accroître les difficultés et d'augmenter les risques d'erreur de la prévision des pluies en Afrique de l'Est à moyen terme.

Bibliographie

- Beltrando, G., 1990: Variabilité interannuelle des précipitations en Afrique Orientale (Kenya, Ouganda, Tanzanie) et relation avec la dynamique de l'atmosphère, *Géographie*, Aix-Marseille II, 223.
- Beltrando, G. et D. L. Cadet, 1990: Interannual variability of the short rain season in East Africa: relationships with general atmospheric circulation. *Veille Climatique Satellitaire*, **33**, 19-36.
- Black, E., J. Slingo, et K. R. Sperber, 2003: An observational study of the relationship between excessively strong short rains in Coastal East Africa and Indian Ocean SST. *Monthly Weather Review*, **131**, 74-94.
- Camberlin, P. et N. Philippon, 2002: The East African march-may rainy season : Associated Atmospheric Dynamics Predictability over the 1968-1997 period. *Journal of Climate*, **15**, 1002-1019.
- Camberlin, P., G. Beltrando, B. Fontaine, et Y. Richard, 2002: Pluviométrie et crises climatiques en Afrique Tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles ? *Historiens et Géographes*, **381**, 403-414.
- Hastenrath, S., 2000: Zonal Circulations over the equatorial Indian Ocean. *Journal of Climate*, **13**, 2746-2756.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001, the scientific basis*. Cambridge University Press, 881 pp.
- Mutai, C. C., N. Ward, et A. W. Colman, 1998: Towards the prediction of the East African short rains based on sea-surface temperature-atmosphere coupling. *International Journal of Climatology*, **18**, 975-997.
- Ogalo, L. J., 1989: The spatial and temporal patterns of the East African seasonal rainfall derived from principal component analysis. *International Journal of Climatology*, **9**, 145-167.
- Pohl, B. et P. Camberlin, 2005: Intraseasonal to interannual modulation of the influence of the Madden-Julian Oscillation on tropical rainfall: a case study for East Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **submitted**.
- Rowell, D. P., J. M. Ininda, et M. N. Ward, 1994: The impact of sea-surface temperature patterns on seasonal rainfall in East Africa. *International conference on monsoon variability and prediction*.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. Vinayachandran, et Y. Toshio, 1999: The dipole mode event: Indian Ocean's coupled instability phenomenon. *Nature*, **401**, 360-363.
- Webster, P. J., A. M. Moore, J. P. Loschnigg, et R. R. Leben, 1999: Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian ocean during 1997-1998. *Nature*, **401**, 356-360.