

## Variabilité thermique et propagation des ondes de Kelvin équatoriales dans l'Océan Atlantique tropical

Sandrine Djakouré<sup>1,\*</sup>, Anoumou René Tano<sup>1,2</sup>, Adjoua Moïse Famien<sup>1,3</sup>,  
Kouakou Urbain Koffi<sup>1,4</sup>, Youssouf Konaté<sup>1</sup>, Fanny Arouna<sup>1</sup>,  
Mamadou Koné<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'Énergie Solaire [LASMES], UFR SSMT, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Laboratoire de Physique Fondamentale et Appliquée (LPFA), Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Université Alassane Ouattara de Bouaké, Département des Sciences et Techniques, BP V 18 Bouaké 01, Bouaké, Côte d'Ivoire

<sup>4</sup>Département des Sciences et Technologies, École Normale Supérieure, 08 BP 10 Abidjan 08 Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>5</sup>Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement [LSTE], Université Jean-Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

Reçu : 15 Octobre 2023 / Reçu sous sa forme révisée : 22 Avril 2024 / Accepté : 07 Mai 2024

### Résumé :

La variabilité interannuelle de la Température de Surface de la Mer (SST de l'anglais Sea Surface Temperature) et l'influence des ondes de Kelvin équatoriales et côtières sur l'upwelling côtier, sont analysées dans l'Océan l'Atlantique tropical. Une simulation interannuelle forcée en surface par les vents de hautes fréquences du National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), et aux frontières par la réanalyse SODA version 2 (Simple Ocean Data Assimilation) a été conduite. L'évaluation du modèle montre que l'état moyen et la variabilité interannuelle de la SST sont relativement bien représentés en dépit des biais chauds de SST observés. Ces biais sont par ailleurs observés pour la majorité des simulations en interannuelle dans l'Atlantique tropical. L'analyse spectrale du signal de la SST suggère que la dynamique des processus physiques la gouvernant est différente à l'est du Cap des Palmes et à l'est du Cap des Trois Pointes. Une analyse des diagrammes longitude-temps de la tension de vent zonale, de la profondeur de la thermocline et de la SST à l'équateur et le long des côtes Nord du Golfe de Guinée a été menée. Les résultats montrent bel et bien une signature en thermocline de la propagation d'ondes de vitesses qui correspondent à celles des ondes de Kelvin équatoriales et côtières du 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres barocline. Aucune connexion entre le signal d'upwelling équatorial et l'upwelling côtier au Nord du Golfe de Guinée n'est visible en SST, mais juste en thermocline. Ainsi, l'effet du vent lointain par la propagation d'ondes de Kelvin équatoriales et côtières n'est pas la cause première des

\*Auteur correspondant:

Adresse e-mail: [djakoure.sandrine@ufhb.edu.ci](mailto:djakoure.sandrine@ufhb.edu.ci) (S. Djakouré)

remontées d'eaux froides à la côte Nord du Golfe de Guinée. Ces ondes équatoriales et côtières générées après l'intensification des vents dans l'Ouest du bassin, transporteraient plutôt un signal d'ajustement à l'échelle du bassin de la structure thermique.

**Mots-clés :** Température de Surface de la Mer ; Upwelling côtier ; Ondes de Kelvin équatoriales et côtières ; Océan Atlantique tropical ; Golfe de Guinée.

---

### **Abstract:**

The interannual variability of Sea Surface Temperature (SST) and the influence of equatorial and coastal Kelvin waves on coastal upwelling are analyzed in the tropical Atlantic Ocean. An interannual simulation forced at the surface by high-frequency winds from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) and at the boundaries by SODA version 2 (Simple Ocean Data Assimilation) was conducted. Model evaluation shows that the mean state and interannual variability of the SST are relatively well represented, despite the warm SST biases observed. These biases are also observed for the majority of interannual simulations in the tropical Atlantic. Spectral analysis of the SST signal suggests that the dynamics of the physical processes governing it are different east of Cape Palmas and east of Cape Three Points. An analysis of longitude-time diagrams of zonal wind stress, thermocline depth and SST at the equator and along the northern coast of the Gulf of Guinea was carried out. The results show a thermocline signature of propagating velocity waves that correspond to equatorial and coastal 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> order baroclinic Kelvin waves. No connection between the equatorial upwelling signal and the coastal upwelling north of the Gulf of Guinea is visible in SST, but only in the thermocline. Thus, the effect of the distant wind in propagating equatorial and coastal Kelvin waves is not the primary cause of cold water upwelling at the northern coast of the Gulf of Guinea. Rather, these equatorial and coastal waves, generated after the intensification of winds in the western part of the basin, carry a signal of basin-wide adjustment of the thermal structure.

**Keywords:** Sea Surface Temperature ; Coastal upwelling ; Equatorial and coastal Kelvin waves ; Tropical Atlantic Ocean ; Gulf of Guinea.

---

## **1 Introduction**

Situé dans la partie Est de l'océan Atlantique tropical (Figure 1), le Golfe de Guinée (GG) est une région où la variabilité thermique interannuelle est de l'ordre de 2°C. Elle est moins marquée que la variabilité saisonnière qui est l'ordre de 5°C [1].

Ces importantes variations sont dues à la proximité de la thermocline dans cette partie du bassin et à la présence de deux zones de remontées d'eaux froides profondes à la surface. Ce sont les zones d'upwelling. La remontée la plus importante tant en intensité qu'en

extension spatiale, est la langue d'eau froide (Atlantic Cold Tongue en anglais, ACT) [2]. La deuxième zone est la région de l'upwelling côtier au Nord du Golfe de Guinée [3]. Il a été montré que ces remontées influencent l'amplitude et l'intensité de la mousson Africaine et ainsi modifie le climat régional [4-6].

Une étude proposée par [7] sur la variabilité interannuelle de la température de surface de la mer (Sea Surface Temperature en anglais, SST est l'acronyme que nous utiliserons par la suite) a permis d'observer à la fois des années chaudes (1982 à 1986) et froides (1987 à 1990). Cette étude a été réalisée à partir des données de SST du radiomètre Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), des années 1982 à 1991. Il a été également montré que l'année 1984 a été une année exceptionnellement chaude, associée à l'évènement El Niño Atlantique de 1982-1983 [8].

Peter [9] a aussi proposé une étude de la variabilité interannuelle de la SST dans la région [2°S-0°N ; 15°W-5°W], à partir d'une simulation numérique ORCA05 de 1992 à 2000. Cette étude suggère que les processus verticaux tels que les flux de chaleur air-mer et les processus océaniques de subsurface expliqueraient essentiellement les années froides et chaudes de la période 1996-1998. Ces résultats ont été mis en exergue grâce à un bilan de chaleur de la couche de mélange.

Une étude menée par [10] a permis d'analyser la variabilité interannuelle de l'upwelling côtier de l'été boréal, de 1982 à 2010, dans la région du Golfe de Guinée. Il ressort de cette étude que les zones de fortes variabilités interannuelles sont identiques à celles de fortes variabilités saisonnières. De plus, une tendance au réchauffement de la

SST d'une valeur de 0,03°C est observée dans l'ensemble sur la période d'étude [11, 12]. Les résultats suggèrent également que le phénomène El Niño du Pacifique influencerait l'upwelling côtier du GG. Par la suite, une analyse des indices d'upwelling, calculés à partir des données TRMM/TMI couvrant la période allant de 1999 à 2011, présente l'année 2001 comme celle qui a enregistré la plus forte intensité d'upwelling [11]. La complexité de la variabilité interannuelle de l'upwelling côtier relevée par les précédents travaux pourrait être liée aux influences d'autres processus océaniques.

L'Atlantique tropical est le siège d'ondes longues équatoriales : (i) les ondes de Kelvin équatoriales qui se propagent vers l'Est et (ii) les ondes de Rossby qui se propagent vers l'Ouest. Ces ondes sont principalement attribuées à un ajustement de l'océan suite aux changements de la tension du vent zonal à l'Ouest du bassin [13, 14]. En effet, si l'on suppose une anomalie positive de vent à l'Ouest du bassin, celle-ci va générer la propagation d'ondes de Kelvin piégées à l'équateur. Ces ondes vont se propager selon ce guide d'onde équatorial. Une fois arrivées sur la côte africaine, ces ondes de Kelvin non dispersives vont se réfléchir en ondes de Kelvin côtières se propageant vers les pôles et en ondes de Rossby équatoriales se propageant vers l'Ouest [15-18]. Cette propagation d'ondes justifie certains aspects de la variabilité interannuelle du niveau de la mer (Sea Surface Height en anglais, SSH) et de SST [16]. La variabilité interannuelle de la SSH induite par la propagation de ces ondes affecte la dynamique du bassin de l'Atlantique tropical. Ainsi, les ondes de Kelvin côtières influenceraient la dynamique océanique de

la région Nord du GG. Sur leur passage, les ondes de Kelvin côtières modèleraient non seulement, la structure verticale et les courants océaniques, mais aussi le contenu thermique et biogéochimique des couches éclairées. Elles semblent avoir également un impact sur la productivité des écosystèmes (ressources halieutiques) et la mousson africaine [19].

Le forçage lointain et les ondes de Kelvin équatoriales et côtières seraient à l'origine de l'upwelling côtier du GG [20-23]. La relation entre les ondes de Kelvin côtières et l'upwelling côtier n'est cependant pas clairement établie. En effet, les résultats des études de [3] mettent en évidence deux processus distincts de génération de l'upwelling côtier : l'upwelling à l'Est du Cap des Palmes, de type détachement de courant et celui à l'Est du Cap des Trois Pointes principalement associé au transport d'Ekman. Comment alors se manifesterait l'influence des ondes de Kelvin côtières sur l'upwelling côtier ?

Cette étude a pour objectif d'analyser premièrement la variabilité interannuelle de la SST et d'évaluer par la suite le rôle potentiel des ondes de Kelvin équatoriales et côtières sur l'établissement de l'upwelling côtier au Nord du GG. L'étude de la dynamique des ondes équatoriales se faisant à l'échelle intra-saisonnière, l'approche numérique est utilisée. Les sorties d'une simulation forcée par des vents de hautes fréquences du modèle Regional Oceanic Modeling System (ROMS) [24, 25], sont utilisées pour analyser l'effet des hautes fréquences de vents sur la dynamique océanique.

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Le "Regional Oceanic modelling system (ROMS)"

L'étude de la dynamique des ondes équatoriales se faisant à l'échelle interannuelle et intra-saisonnière, une simulation du modèle Regional Oceanic modelling system (ROMS) [24] a été mise en place. Pour cette étude, la version ROMS avec l'option emboîtement (two-ways nesting) a été choisie. Cette version qui a été développée à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), utilise la méthode AGRIF (Adaptative Grid Refinement In Fortran) [25, 26]. Cette méthode permet d'emboîter une grille haute résolution (grille enfant) dans une autre à plus basse résolution (grille parent) pour une modélisation à moindre coût.

Le domaine est construit selon une grille Mercator sur l'Atlantique tropical (grille parent) avec une zone d'emboîtement sur le Golfe de Guinée (grille enfant). Le domaine de l'Atlantique tropical est circonscrit à la zone 65.2°W-15°E ; 10°S-14°N, avec une résolution horizontale de 22 km. Le Golfe de Guinée est délimité à la zone 12,33°W-11,73°E ; 3,98°S-8,05°N, avec une résolution horizontale de 7 km. Sur la verticale, le modèle est discrétisé selon 45 niveaux sigma. La résolution verticale diminue ainsi avec la profondeur. La bathymétrie du modèle a été interpolée à partir des données grillées du Global Earth Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO1: <http://www.gebco.net>). La configuration est pratiquement identique à celle de [3, 27]. En effet, seuls les forçages atmosphériques et les conditions aux limites ont été modifiés.

Le modèle est forcé par des vents de hautes fréquences de la National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis-CFSR [28]. Ce produit est une réanalyse de haute résolution spatio-temporelle des systèmes couplés atmosphère-océan-continent-mer de glace couvrant la période 1979 à Janvier 2010. La résolution spatiale des paramètres atmosphériques est d'environ 38 km et celle de l'océan de 14 km à l'équateur et de 21 km au-delà des tropiques. Ces différents produits sont disponibles à la fréquence horaire.

Les flux de chaleur introduits dans le modèle sont calculés à partir des paramètres atmosphériques de la réanalyse CFSR. Le modèle est forcé à ses limites ouvertes par les données de température, de salinité, d'élévation de surface de la mer issues de la version 2.1.6 de la réanalyse océanique SODA (Simple Ocean Data Assimilation) [29-31]. Cette réanalyse de résolution spatiale  $\frac{1}{2}^{\circ} \times \frac{1}{2}^{\circ}$  avec 40 niveaux verticaux est disponible de 1958 à 2008. La simulation interannuelle appelée RefCFSR, obtenue à partir de forçage de vent à haute fréquence (chaque 6 heures) couvre la période de 1979 à 2008. Il s'agit donc de 31 années de données. L'état d'équilibre des variables T et S est atteint après 12 années. Pour cette étude, les sorties de cette simulation sont uniquement exploitées sur 18 années, soit de 1991 à 2008.

## 2.2 Les observations et produits utilisés

Pour évaluer les sorties de la simulation interannuelle, nous disposons des produits d'observations provenant des satellites et de ré-analyses. Le produit de vents utilisés est celui de la "National Centers for

Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis- CFSR" [28]. Ce produit a été décrit dans la section précédente.

Pour la température de surface de la mer (SST), les champs suivants ont été utilisés : (i) les champs radiomètres MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) embarqué sur le satellite Terra de la "National Aeronautics and Space Administration (NASA)". Les données MODIS disponibles à l'adresse <http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>, sont maillées à une résolution de 4 km ; (ii) la SST de la climatologie Pathfinder V5.1 du radiomètre Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)". Ce produit, à 4 km de résolution spatiale, est disponible sur le site <http://www.nodc.noaa.gov/sog/pathfinder4km>. Enfin, (iii) la SST, provenant du radiomètre Tropical Rainfall Measuring Mission/Microwave Imager (TRMM/TMI) à 25 km de résolution spatiale, a été également utilisée pour l'évaluation de la simulation interannuelle. Ce produit est disponible sur le site [http://www.ssmi.com/tmi/tmi\\_validation.html](http://www.ssmi.com/tmi/tmi_validation.html). Ces différents jeux de données satellitaires de température de surface de la mer et de vents, sont utilisés sur la période 1991 à 2008.

## 3 Résultats et discussion

### 3.1 Evaluation des sorties de la simulation interannuelle

### 3.1.1 Etat moyen de la température de la mer dans l'Atlantique tropical et le Golfe de Guinée

La distribution spatiale de la moyenne annuelle de la SST AVHRR, MODIS et de la simulation RefCFSR sur tout l'Atlantique tropical est montrée à la figure 1. On observe à grande échelle tant pour les observations que pour RefCFSR, une zone froide dans la partie Sud-Est, une zone chaude dans la partie Ouest du bassin qui se prolonge dans le GG et une zone froide au Nord à environ 12°N. Sur les côtes au Nord du Golfe de Guinée, la SST de RefCFSR est plus en accord avec la SST de AVHRR qu'avec celle de MODIS. On retrouve les eaux de l'isotherme 27°C à la côte qui montrent la présence de l'upwelling côtier. Cependant, les eaux de l'isotherme 27°C s'étendent moins vers le large que celles de AVHRR. La SST de MODIS présente un biais chaud, en moyenne de 0,5°C au niveau du Cap des Palmes. Notons par ailleurs que dans l'ensemble, les températures de MODIS et RefCFSR sont plus chaudes que celles de AVHRR (en moyenne 0,5°C). Un biais chaud pour RefCFSR est aussi à souligner surtout dans les parties Ouest et Sud-Est du bassin. Au niveau de la zone de l'embouchure de l'Amazone, des biais chauds de valeurs maximales 2°C sont simulés. Dans le Sud-Est du bassin, on distingue à peine l'isotherme 25°C dans RefCFSR.

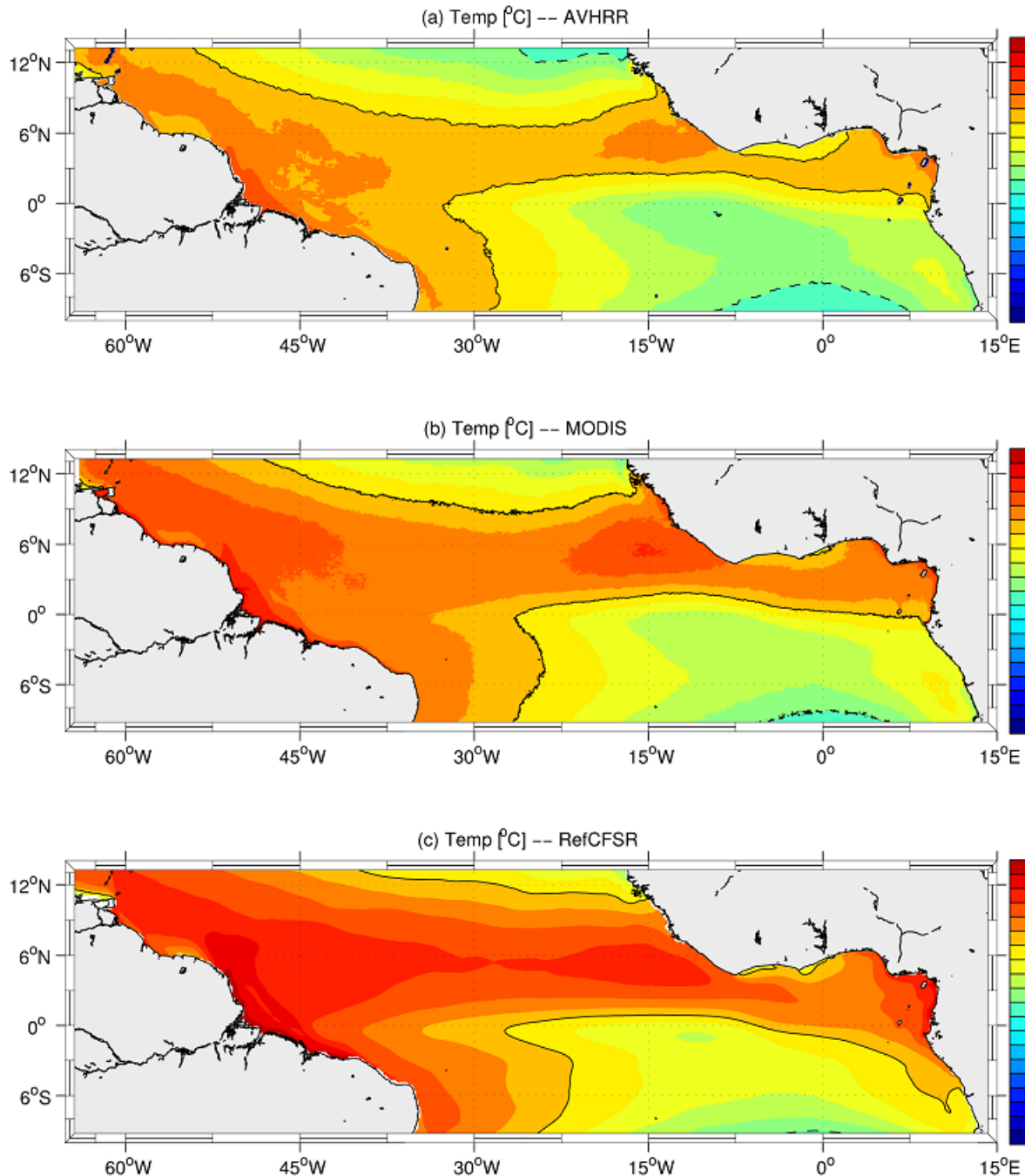
La figure 2 montre une section verticale de la température moyenne à 10°W entre les latitudes 8°S et 2°N du produit CARS2009 et de la simulation RefCFSR. On retrouve les isopycnes  $\sigma=24,5$  ;  $\sigma=25,5$  ;  $\sigma=26,5$  et  $\sigma=26,75$  superposées

sur cette figure. Deux principales différences entre CARS2009 et RefCFSR sont à noter au niveau des isopycnes: l'isopycne  $\sigma=26,75$  qui se trouve déjà en dessous de 200 m entre 8°S et 5°S et le pincement entre l'isopycne  $\sigma=24,5$  et  $\sigma=25,5$  que l'on ne retrouve pas entre 4°S et 3°S. La profondeur de la thermocline représentée par l'isotherme 20°C est assez bien simulée par le modèle (50 m et 75 m) même si le dôme des isothermes localisé à 3°S dans CARS2009, n'est pas reproduit.

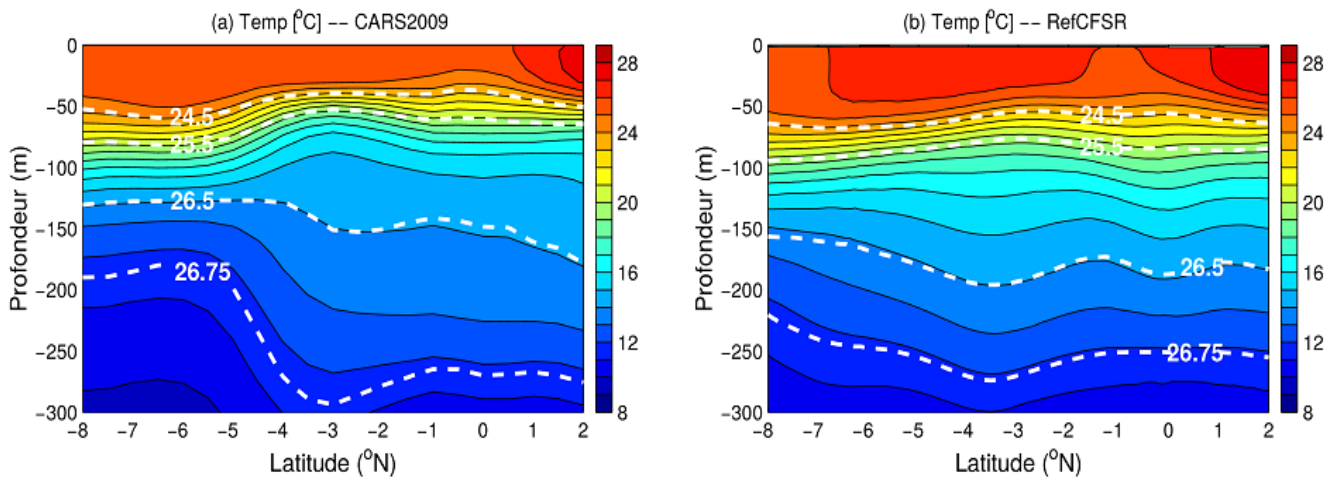
La figure 3 présente la répartition spatiale moyenne de la SST des produits satellites AVHRR, MODIS et de la simulation RefCFSR dans le Golfe de Guinée. Les produits satellites et RefCFSR montrent trois principales zones : une zone froide à la côte Nord du Golfe de Guinée, une autre zone froide au Sud de 2°S et une zone chaude qui sépare les 2 zones froides précédemment citées. Les SSTs MODIS et RefCFSR sont généralement plus chaudes que celles de AVHRR comme nous l'avons vu à grande échelle. En témoigne notamment le positionnement de l'isotherme 26°C qui n'atteint pas 5°E pour MODIS et 8°W pour RefCFSR. A ce même titre, RefCFSR simule des températures supérieures à 28,2°C à l'Ouest vers 4°N et dans le fond du Golfe de Guinée que l'on ne retrouve ni dans MODIS et AVHRR. Cependant, on constate qu'à la côte Nord du Golfe de Guinée, le modèle arrive à mieux reproduire les températures froides caractéristiques de l'upwelling côtier que MODIS. En effet, l'isotherme 27°C au niveau du Cap des Palmes n'est pas présente dans le produit MODIS contrairement à RefCFSR et AVHRR. La dynamique de l'upwelling côtier au Nord du Golfe de Guinée étant celle qui fait l'objet de cette étude, nous avons choisi par

la suite de nous concentrer sur cette zone. Deux zones qui représentent le cœur des deux zones de minima de SST à savoir l'Est du Cap des Palmes et l'Est du Cap des Trois Pointes ont été choisies. Il s'agit de: (i) WGC (Western Guinea Coast [5,5°N-

4°N]\*[7,5°W-6°W]) et (ii) EGC (Eastern Guinea Coast) [5,5°N-4°N]\*[ 2,5°W-0,5°W] situées respectivement à l'Est du Cap des Palmes (upwelling côtier de la Côte d'Ivoire) et à l'Est du Cap des Trois Pointes (upwelling côtier du Ghana) (figure 4).



**Fig. 1.** Carte de répartition spatiale de la température moyenne de surface de la mer [°C] dans l'Atlantique tropical, des produits satellites (a) AVHRR, (b) MODIS, et de la simulation RefCFSR (c). L'intervalle entre les contours est de 0,5°C. Les isothermes 25°C et 27°C sont représentées respectivement en ligne tiretée noire et ligne noire.



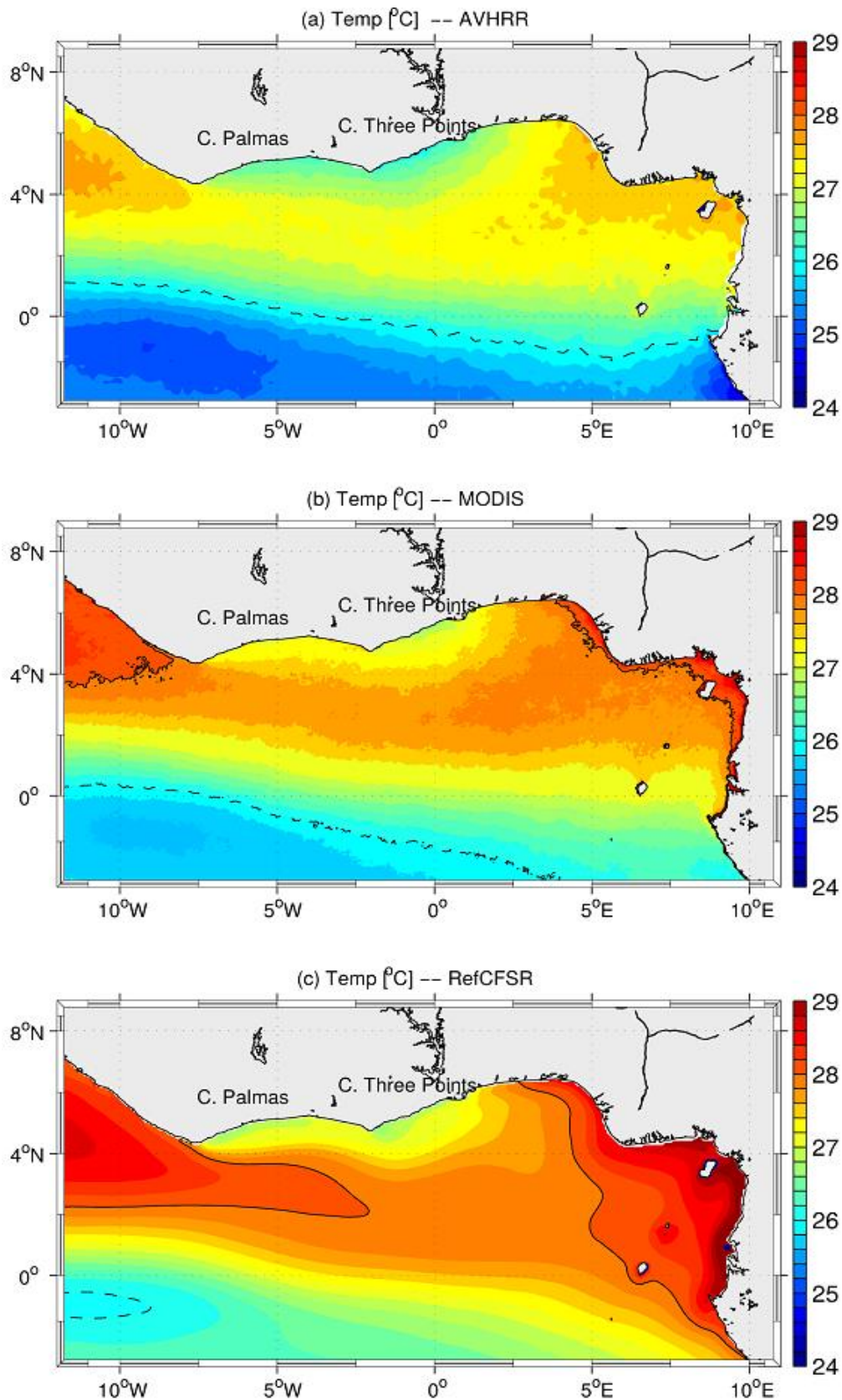
**Fig. 2.** Sections de la moyenne annuelle de la température de surface de la mer [°C] à 10°W pour le produit CARS2009 (a) et la simulation RefCFSR (b). L'intervalle entre les contours est de 1°C. Les isopycnés  $\sigma=24,5$  ;  $25,5$  ;  $26,5$  ;  $26,75$  sont superposées en lignes tiretées blanches.

La variabilité saisonnière de la SST des produits satellites MODIS, TMI, AVHRR et de la simulation RefCFSR est montrée à la figure 5 pour les zones WGC (5a) et EGC (5b). De manière générale, les produits satellites et le modèle montrent pratiquement la même variabilité saisonnière dans les deux zones. Cependant, certaines différences sont à souligner. Dans la zone WGC, la SST simulée est dans l'ensemble cohérente avec celle de MODIS et AVHRR tout le long de l'année. On peut noter que la SST de TMI présente un biais chaud tout le long de l'année par rapport aux 3 autres SSTs. Ce biais atteint 2°C de décembre à mars, et environ 1,5°C pendant la grande saison froide de juillet à septembre. Ce biais chaud peut être lié à la résolution spatiale de TMI (25 km) qui ne permet donc pas à ses capteurs d'échantillonner très près des côtes.

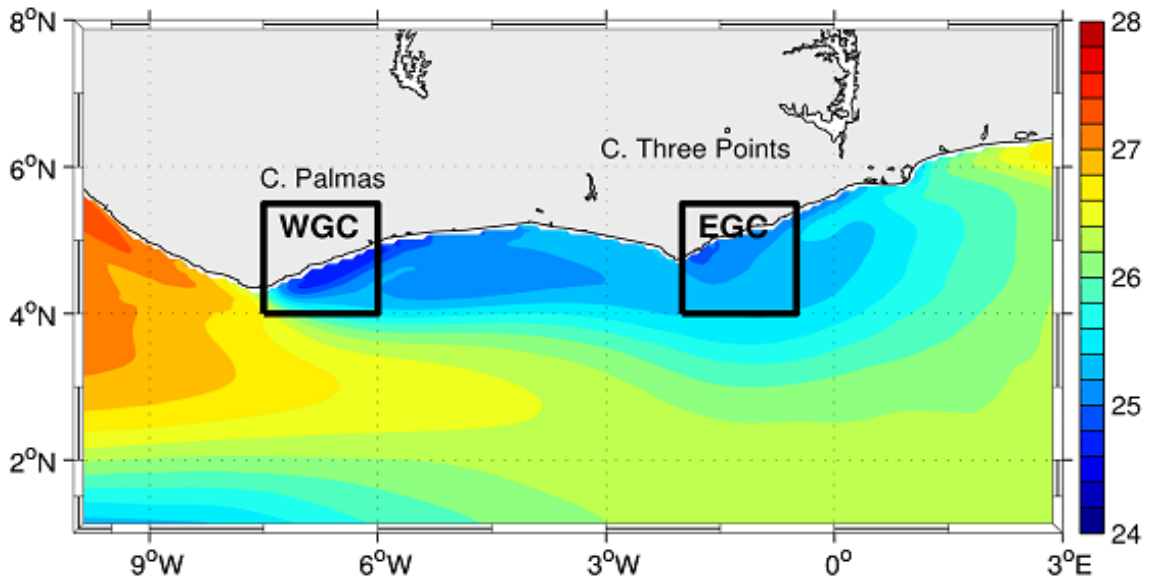
De décembre à février, on observe une baisse de la SST caractéristique de la petite

saison froide [11, 32] pour les 3 produits satellites et le modèle. Une hausse de la température est par la suite observée jusqu'en mai avec des valeurs maximales supérieures à 28°C au mois de mai : c'est la grande saison chaude. Une décroissance des différentes SSTs caractéristiques de la grande saison froide s'en suit avec les valeurs minimales atteintes en août pour RefCFSR (24,8°C), MODIS (25,2°C) et TMI (26,4°C) tandis que le minimum pour AVHRR de valeur 24,6°C est atteint un mois plus tard en septembre. Remarquons que les SSTs AVHRR et RefCFSR sont les mêmes en août. A partir de septembre, une nouvelle hausse de la température qui marque le début de la petite saison chaude est notée avec des valeurs maximales supérieures à 27°C atteintes au mois de décembre. Cette valeur maximale est de 27,6°C pour AVHRR, de 28,4°C pour MODIS et RefCFSR, de 30,2°C pour TMI.

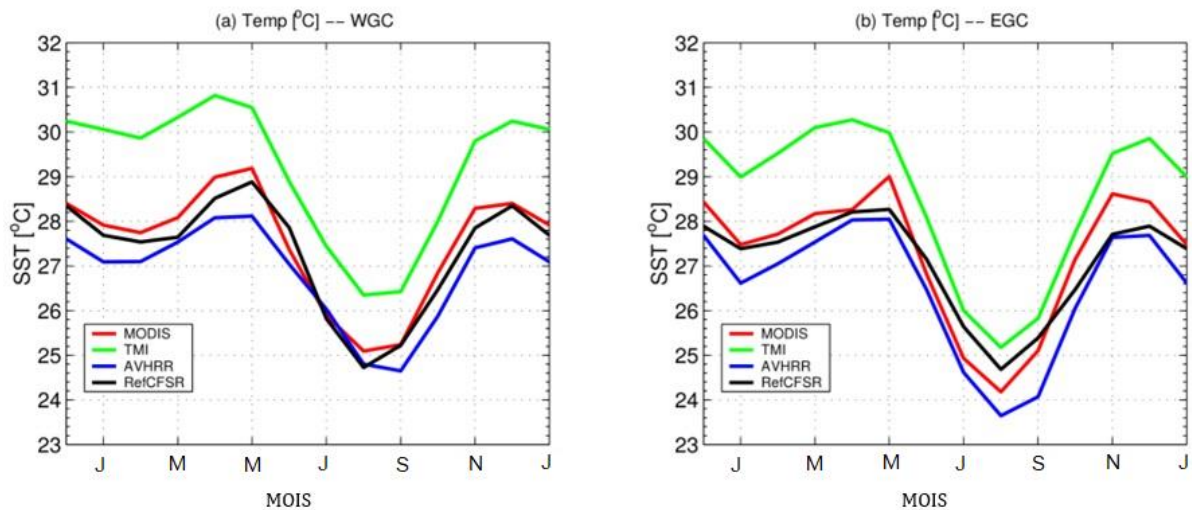




**Fig. 3.** Carte de répartition spatiale de la température de surface de la mer [°C] pendant la grande saison froide (JAS) dans le Golfe de Guinée pour les produits (a) AVHRR, (b) MODIS et la (c) simulation RefCFSR. L'intervalle entre les contours est de 0,2°C. Les isothermes 26°C et 28°C sont représentées respectivement en ligne tiretée noire et ligne noire.



**Fig. 4.** Carte de répartition spatiale de la température de surface de la mer (SST) [°C] dans le Golfe de Guinée pendant la grande saison froide (Juillet-Août-Septembre, JAS). Les zones d'études WGC (Western Guinea Coast [5.5°N-4°N]\*[7.5°W-6°W]), EGC (Eastern Guinea Coast [5.5°N-4°N]\*[2.5°W-0.5°W]) y sont matérialisées.



**Fig. 5.** Variabilité interannuelle de la température de surface de la mer [°C] des satellites MODIS (2002-2008), TMI (1998-2008), AVHRR (1991-2008) et de la simulation RefCFRSR (1991-2008) pour (a) WGC [4°N-5.5°N;7.5°W-6°W] et (b) EGC [4°N-5.5°N;2°W-0.5°W] en traits pleins. Les mois de l'année sont représentés en abscisse. Ils sont représentés de décembre à janvier soit : décembre, janvier, février, mars, avril, mai, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre, décembre et janvier.

Les différentes phases du cycle saisonnier observées dans la zone WGC le sont aussi pratiquement pour EGC : à savoir des températures plus basses caractéristiques de la petite saison d'upwelling, de décembre à mars pour les trois produits satellites et le modèle ; une hausse de mars à mai (MODIS, AVHRR et RefCFSR, TMI) ; une autre décroissance de mai à septembre et une 2<sup>ème</sup> hausse entre octobre et décembre. On peut toujours noter, le biais chaud de TMI par rapport aux trois autres SSTs surtout en janvier-mai et novembre-décembre. Dans cette zone, la température minimale est atteinte en août pour les trois produits satellites et le modèle. Cette valeur minimale est de 23,6°C pour AVHRR, de 24,2°C pour MODIS, de 24,6°C pour RefCFSR et de 25,2°C pour TMI.

Malgré certaines différences, nous pouvons dire que la variabilité saisonnière de la SST est quasiment bien reproduite par le modèle dans les deux zones. Les minima de SST pendant la grande saison froide sont peu différents des produits satellites AVHRR et MODIS surtout dans la zone WGC.

Ainsi, l'évaluation des sorties de la simulation interannuelle de la température de la mer a montré certaines disparités au niveau de RefCFSR notamment des valeurs de températures un peu plus élevées que les produits satellites MODIS et AVHRR. Il n'en demeure pas moins que l'état moyen, la grande saison froide, la structure verticale et l'évolution saisonnière dans les deux zones caractéristiques des 2 zones de minima de l'upwelling côtier au Nord du Golfe de Guinée soient assez correctement reproduits dans le modèle. Notons que l'évaluation des autres variables telles le courant zonal, la salinité de mer, l'élévation du niveau de la mer, à l'échelle saisonnière a été menée de manière satisfaisante par [30].

### **3.1.2 La température de la mer dans l'Atlantique tropical et le Golfe de Guinée à l'échelle interannuelle**

Après avoir évalué l'état moyen de la simulation RefCFSR, nous analysons dans cette section la variabilité interannuelle de la température de surface de la mer. Pour évaluer cette simulation, nous utilisons les produits satellites : (i) du radiomètre MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) de résolution spatiale 4 km sur la période 2002-2008, (ii) du radiomètre TRMM/TMI (tropical Rainfall Measuring Mission) Microwave Imager (TMI) de résolution spatiale 25 km sur la période 1998-2008, (iii) du radiomètre Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de résolution spatiale 4 km sur la période 1991-2008.

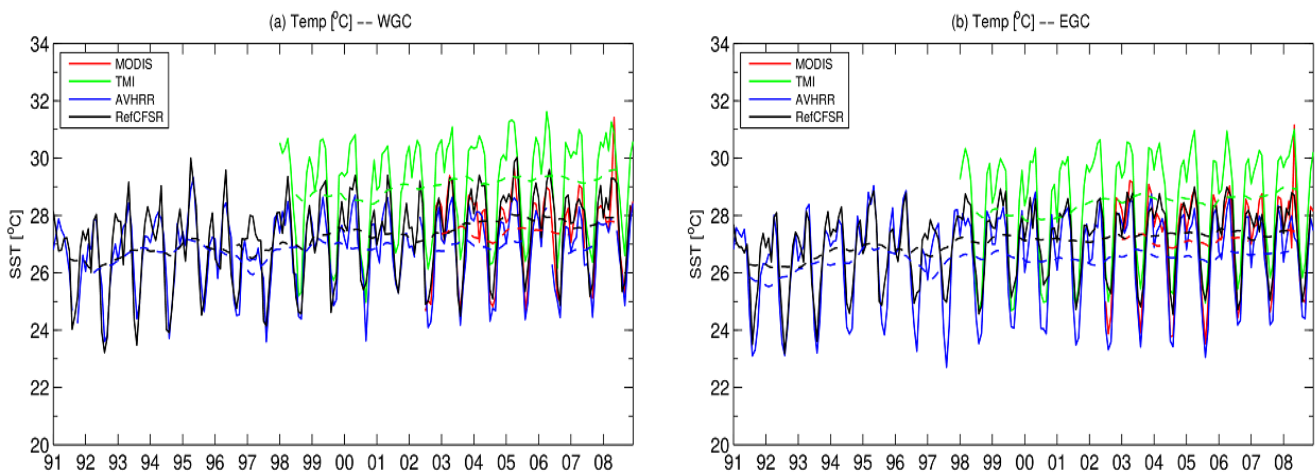
La figure 6 montre la série temporelle mensuelle de la SST de 1991-2008 de la simulation RefCFSR et des trois produits satellites énumérés plus haut chacun sur sa période de disponibilité dans les zones WGC (figure 6(a)) et EGC (figure 6(b)). Les moyennes glissantes correspondantes à chaque produit et simulation sont superposées sur les figures. Ces moyennes glissantes permettent de supprimer les fluctuations transitoires afin de mettre en évidence les tendances à long terme. Dans la zone WGC (figure 6(a)), les courbes des moyennes glissantes des SSTs de MODIS, AVHRR, et RefCFSR ont quasiment les mêmes allures. Les courbes de ces moyennes glissantes sont comprises entre 26°C et 28°C. La moyenne glissante de la SST TMI est plus élevée que celles de MODIS, AVHRR et RefCFSR. Elle varie entre 28,5°C et 29°C. Ces biais chauds en

température de TMI par rapport aux autres produits, avaient déjà été soulignés lors de l'évaluation de l'état moyen. Ces biais chauds sont aussi visibles sur les valeurs brutes mensuelles qui excèdent  $31^{\circ}\text{C}$  comme en 2003, 2005 et 2006 alors que les trois autres SSTs atteignent à peine  $30^{\circ}\text{C}$ . De 1991 à 2008, un cycle saisonnier très marqué est visible pour chacune des 4 courbes. En moyenne, la SST RefCFSR se rapproche de celle d'AVHRR. Cependant, on peut noter que la SST RefCFSR est plus élevée pendant les saisons chaudes sur les 18 années de la série temporelle et également plus élevée pendant les saisons froides comme en 1997, 2000 et de 2002 à 2008.

Dans la zone EGC (figure 6(b)), les courbes des moyennes glissantes de RefCFSR et d'AVHRR ont toujours la

même allure. Cependant, contrairement à la zone WGC, les valeurs de ces moyennes présentent une nette différence, environ de  $0,4$  de 1996 à 2008. La SST dérivée de TMI présente toujours un biais de  $1^{\circ}\text{C}$  à  $2^{\circ}\text{C}$  par rapport aux autres SSTs. Contrairement à la zone WGC, la SST RefCFSR est pratiquement identique à celle de MODIS et AVHRR pendant les saisons chaudes. Par contre, pendant les saisons froides, les SSTs de RefCFSR sont plus élevées entre 1994 et 2008. Les différences peuvent atteindre  $2^{\circ}\text{C}$  comme en 1997 et en 2005. La figure 6 montre les biais entre les SSTs MODIS, TMI et RefCFSR par rapport à AVHRR (figure 6(a,b)) dans les zones WGC et EGC.

En moyenne, les différences de température entre RefCFSR et AVHRR n'excèdent pas  $1,5^{\circ}\text{C}$  dans la zone WGC.



**Fig. 6.** Variabilité interannuelle de la température de surface de la mer [ $^{\circ}\text{C}$ ] et de son anomalie moyennée chaque année pendant la grande saison froide (JAS) des satellites MODIS (2002-2008), TMI (1998-2008), AVHRR (1991-2008) et de la simulation RefCFSR (1991-2008) pour (a) WGC [ $4^{\circ}\text{N}$ - $5.5^{\circ}\text{N}$ ;  $7.5^{\circ}\text{W}$ - $6^{\circ}\text{W}$ ] et (b) EGC [ $4^{\circ}\text{N}$ - $5.5^{\circ}\text{N}$ ;  $2^{\circ}\text{W}$ - $0.5^{\circ}\text{W}$ ].

### 3.2 Analyse spectrale de la température de surface de la mer

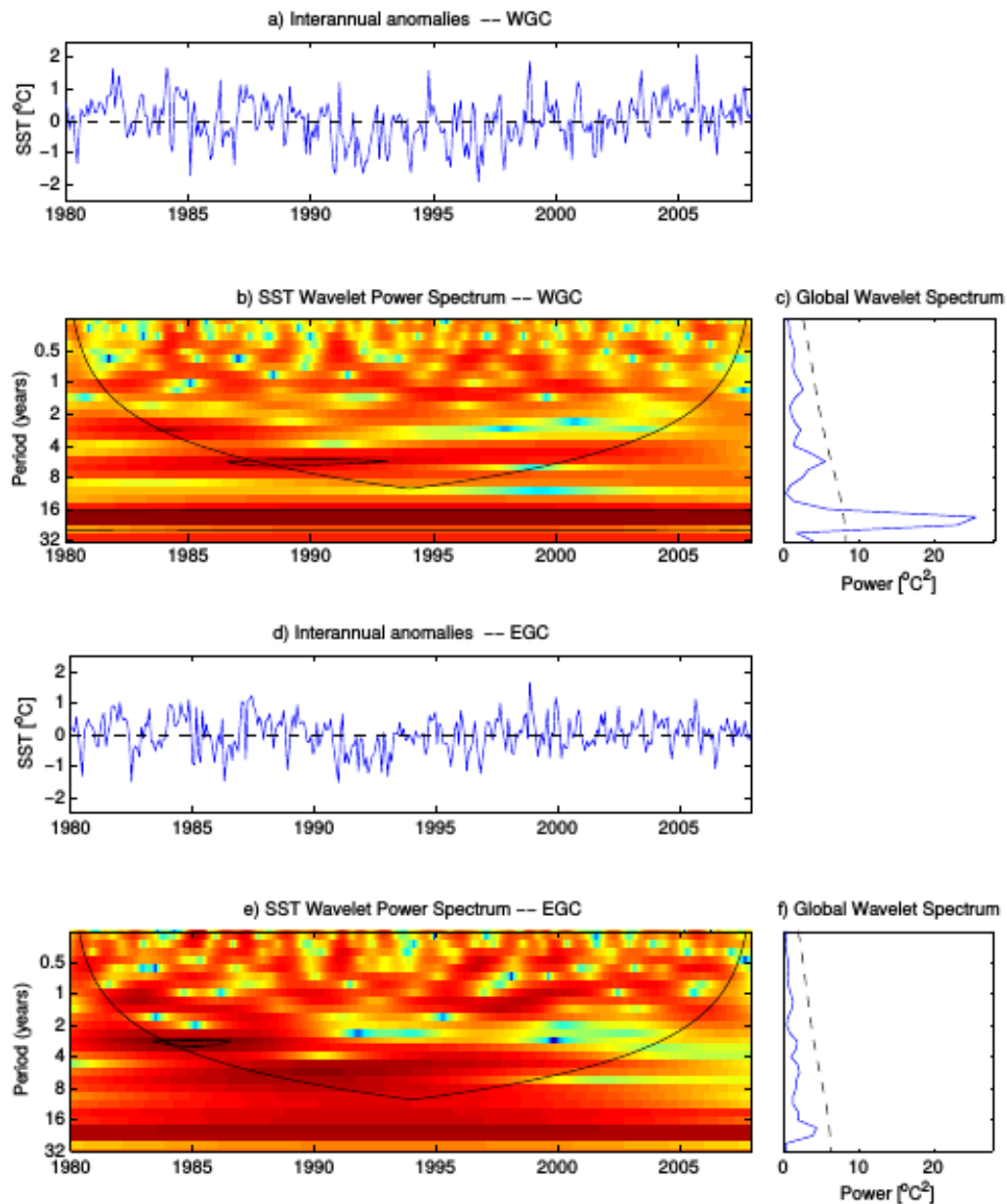
Nous avons réalisé une analyse spectrale des anomalies interannuelles de la SST dans les zones WGC et EGC de 1980 à 2008 (figure 7). Pour obtenir les différentes séries temporelles des anomalies interannuelles (figure 7(a,d)), le cycle saisonnier et la tendance linéaire ont été enlevés du signal total.

L'analyse spectrale permet de mettre en évidence l'amplitude des signaux dominants de la série temporelle (figure 7(b,c,e,f)). Nous avons ainsi pu identifier à la côte Nord du Golfe de Guinée plusieurs périodes chaudes dont les années 1995 et 1999. Ces années ont été associées respectivement aux phénomènes El-Niño de l'Océan Pacifique des années 1990-1995 et 1997-1998 [10]. Nous avons également identifié les périodes froides de 1997, 2005 qui ont été observées une année après La Niña de l'Océan Pacifique [11, 34]. Cette analyse spectrale montre pour WGC des pics d'énergie à environ 3 ans de 1984 à 1985, à environ 7 ans de 1987 à 1993 et de 16-25 ans entre 1980 et 2008. On remarque que seulement le pic d'énergie entre 16 et 25 ans est significatif à 95%. Pour EGC, on observe seulement 1 pic d'énergie à environ 3 ans de 1984 à 1987 et 1 pic entre 16 et 25 ans. Cependant, ces deux pics ne sont pas significatifs. Ces différences entre les spectres des anomalies interannuelles de ces deux zones situées l'une à l'Est du Cap des Palmes et l'autre à l'Est du Cap des Trois Pointes suggèrent que la dynamique des processus physiques gouvernant la SST

dans ces deux zones est soit différente ou que l'influence des processus océaniques agit de manière différente sur ces deux zones. Ces résultats confortent ceux de [3] qui avaient montré que des mécanismes différents gouvernent la dynamique de l'upwelling à l'Est du Cap des Palmes et celui à l'Est du Cap des Trois Pointes.

### 3.3 Les ondes de Kelvin équatoriales et côtières et l'upwelling côtier

Dans cette section, nous nous intéressons à l'influence des ondes de Kelvin équatoriales et côtières sur la génération de l'upwelling côtier du Golfe de Guinée proposée par [20, 22, 23]. L'étude du suivi des ondes équatoriales et côtières et de leur influence sur l'upwelling côtier a généralement été menée à partir des produits d'anomalies de la "Sea Level" [11, 17]. On peut toutefois noter que [21] a utilisé des observations de SST de seize stations côtières pour montrer qu'un signal d'upwelling de vitesse  $0,7 \text{ m s}^{-1}$  se propage d'Est en Ouest le long de la côte Nord du Golfe de Guinée. La propagation de ce signal a été attribuée aux ondes côtières piégées à la côte. Les résultats de cette étude suggèrent aussi que l'effet du vent lointain est un facteur qui influencerait la SST dans le Golfe de Guinée. Cependant, des analyses complémentaires de la structure thermique et de la "Sea Level" à partir de modèles numériques sont indispensables pour valider totalement le forçage lointain comme principale cause de génération de cet upwelling.



**Fig. 7.** Analyse spectrale de la température de surface de la mer (SST) dans le Golfe de Guinée pour WGC (figure du haut) et EGC (figure du bas) : (a, d) anomalies interannuelles [ $^{\circ}\text{C}$ ], (b, e) le spectre d'énergie (la ligne représente le cône d'influence) et (c, f) le spectre d'énergie global (la courbe tiretée est le spectre du niveau de significativité à 95%).

### 3.4 Variabilité de la profondeur de la thermocline et de la température de surface de la mer

Nous analysons dans cette section des cartes d'évolution des anomalies de la tension de vent zonal, de la profondeur de la thermocline et de la température de surface de la mer. Pour cela une analyse conjointe entre ces variables, le long de la

trajectoire supposée de ces ondes est effectuée. Il s'agit donc d'analyser les anomalies de la tension de vent zonal, de la profondeur de la thermocline et de la température de surface de la mer le long de l'équateur (de 35°W à la côte africaine (0°N-9.5°E)) et tout le long de la côte Nord du Golfe de Guinée (de 0°N-9.5°E jusqu'au Nord du Golfe de Guinée à 9°W). Nous avons choisi d'analyser les années 2004, 2005 comme exemple d'années de fort refroidissement [33, 34] et 2006 pour son fort réchauffement [34].

Les figures 8(a), 8(b) et 8(c) représentent respectivement le diagramme longitude-temps des anomalies de la tension de vent zonal, de la profondeur de la thermocline et de la SST de mars à septembre 2004. Une continuité entre les anomalies de tension de vent zonal entre l'équateur et la côte est observée. On observe également des signaux de propagation d'Ouest en Est des anomalies de la profondeur de la thermocline de l'équateur à la côte Nord du Golfe de Guinée. Ces signaux ont des vitesses de phase en moyenne de 0,83 m s<sup>-1</sup>. Une continuité est observée entre ces ondes et celles qui se propagent le long de la côte. Cependant, les vitesses de ces ondes à la côte sont un peu plus élevées, de valeurs 0,85 m s<sup>-1</sup>. Au niveau de la SST, aucune propagation d'onde d'Ouest en Est entre l'équateur et la côte n'est visible. Entre juin et septembre le long de l'équateur, des signaux d'anomalies positives de SST se propagent d'Est en Ouest avec des vitesses de propagation de l'ordre de 0,32 m s<sup>-1</sup>.

En 2005 (figures 9(a), 9(b) et 9(c)), une continuité entre les anomalies de tension de vent zonal entre l'équateur et la côte est toujours observée. Des signaux de propagation d'Ouest en Est des anomalies

de la profondeur de la thermocline de l'équateur à la côte Nord du Golfe de Guinée sont toujours observés. Ces vitesses sont en moyennes de 1,03 m s<sup>-1</sup> entre avril et juillet. Ces vitesses sont un peu plus élevées qu'en 2004. Le long de la côte, ces ondes ont une vitesse moyenne de l'ordre de 0,84 m s<sup>-1</sup>, quasiment identique à celle de 2004. On peut aussi noter qu'entre avril et début mai 2005 une anomalie positive de la profondeur de la thermocline alors que pendant cette même période en 2004, il y avait une anomalie négative de la profondeur de la thermocline. On peut constater parallèlement que les anomalies de la tension zonale de vent entre avril et mai en 2005 étaient essentiellement négatives contrairement à 2004. Ce qui peut expliquer que l'année 2004 a été en général plus froide que 2005 [30]. Aucune évidence de propagation d'ondes d'Ouest en Est de la SST n'est également visible en 2005. Seulement des signaux d'anomalies positives de SST d'Est en Ouest quasiment identiques à ceux de 2004 de vitesses moyennes de 0,38 m s<sup>-1</sup> sont trouvés.

En 2006 (figures 10(a), 10(b) et 10(c)), on remarque des anomalies positives de tension de vent zonal en mai et juin associées à des anomalies négatives de la profondeur de la thermocline. En 2005, entre mai et juin, on avait plutôt des anomalies négatives de la tension de vent zonal associées à des anomalies positives de la profondeur de la thermocline. Ce qui explique que la SST en juin 2005 était plus froide que celle en 2006 comme l'ont décrit Carton et Giese [31]. Ces auteurs ont analysé cette différence en SST entre les mois de juin 2005 et 2006. Cette différence a été attribuée à un déclenchement rapide et précoce de l' "Atlantic Cold Tongue" en 2005. Cet évènement a été favorisé par une

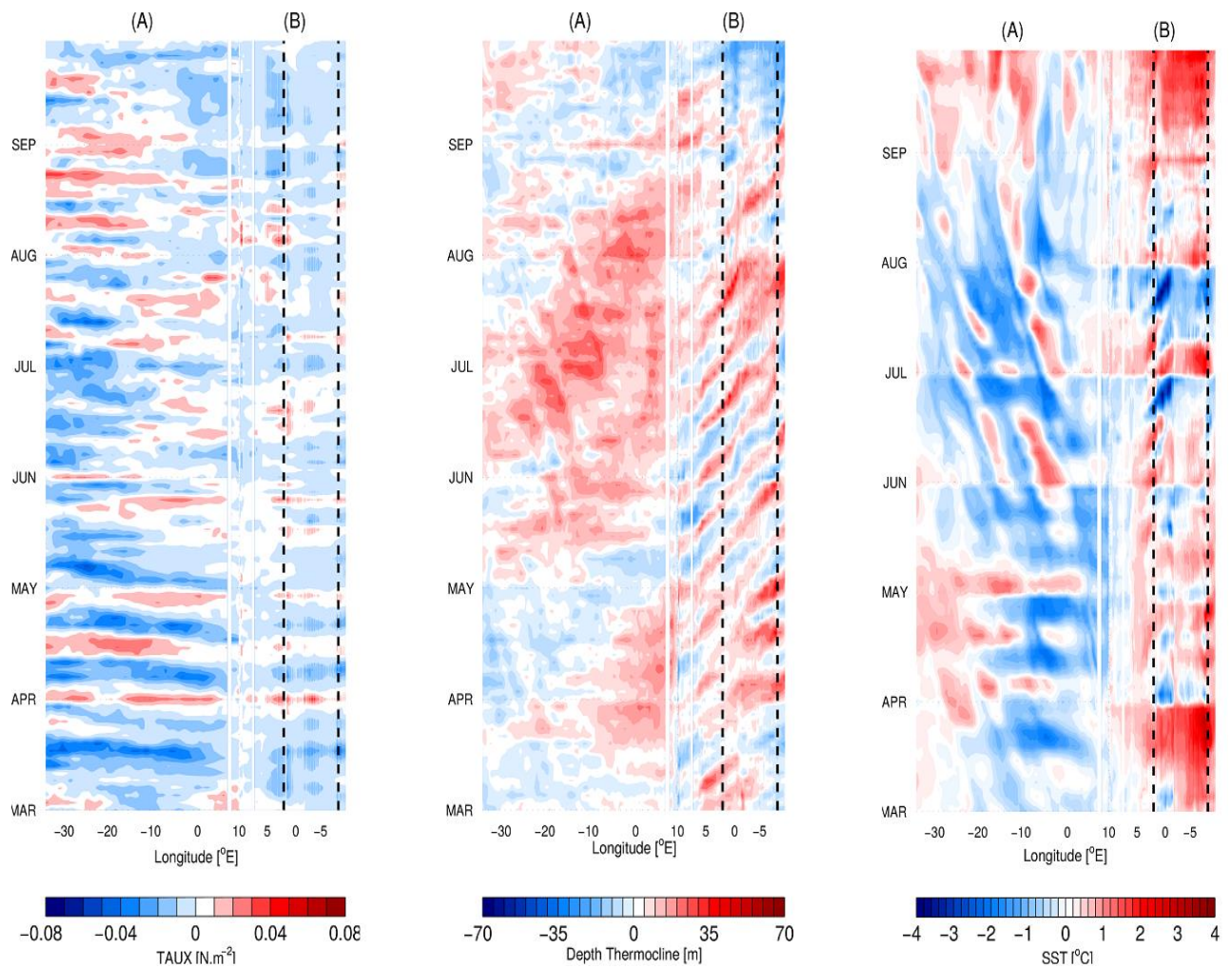
plus forte intensité des alizés dans l'Ouest du bassin et par une intensification exceptionnelle des alizés de Sud-Est pendant cette année 2005.

Une propagation de signaux en moyenne de  $1,27 \text{ m s}^{-1}$  de la profondeur de la thermocline est également visible en 2006. A la côte, elles sont de l'ordre de  $0,83 \text{ m s}^{-1}$ . Pour les anomalies positives de la SST seuls des signaux de vitesses moyennes de  $0,32 \text{ m s}^{-1}$  sont observés. Entre ces trois années, on peut noter des similarités au niveau des vitesses des anomalies de la propagation de la profondeur de la thermocline et celles de la SST. On retrouve des vitesses de propagation de la profondeur de la thermocline d'Ouest en Est, de l'équateur à la côte qui sont comprises entre  $1,27 \text{ m s}^{-1}$  et  $0,83 \text{ m s}^{-1}$ . Ces vitesses d'ondes correspondent aux vitesses des ondes de Kelvin équatoriales de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres barocline. Ces résultats sont en accord avec ceux de [14, 16, 33]. En effet, ces auteurs ont estimé que la vitesse de phase des ondes de Kelvin équatoriales est de l'ordre de  $2,6 \text{ m s}^{-1}$  pour le 1<sup>er</sup> ordre barocline, de  $1,27 \text{ m s}^{-1}$  pour le 2<sup>e</sup> ordre et de  $0,89 \text{ m s}^{-1}$  pour le 3<sup>e</sup> ordre barocline. En général, les ondes de Kelvin équatoriales de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres barocline sont dominantes dans le bassin Atlantique. Les signaux d'ondes en

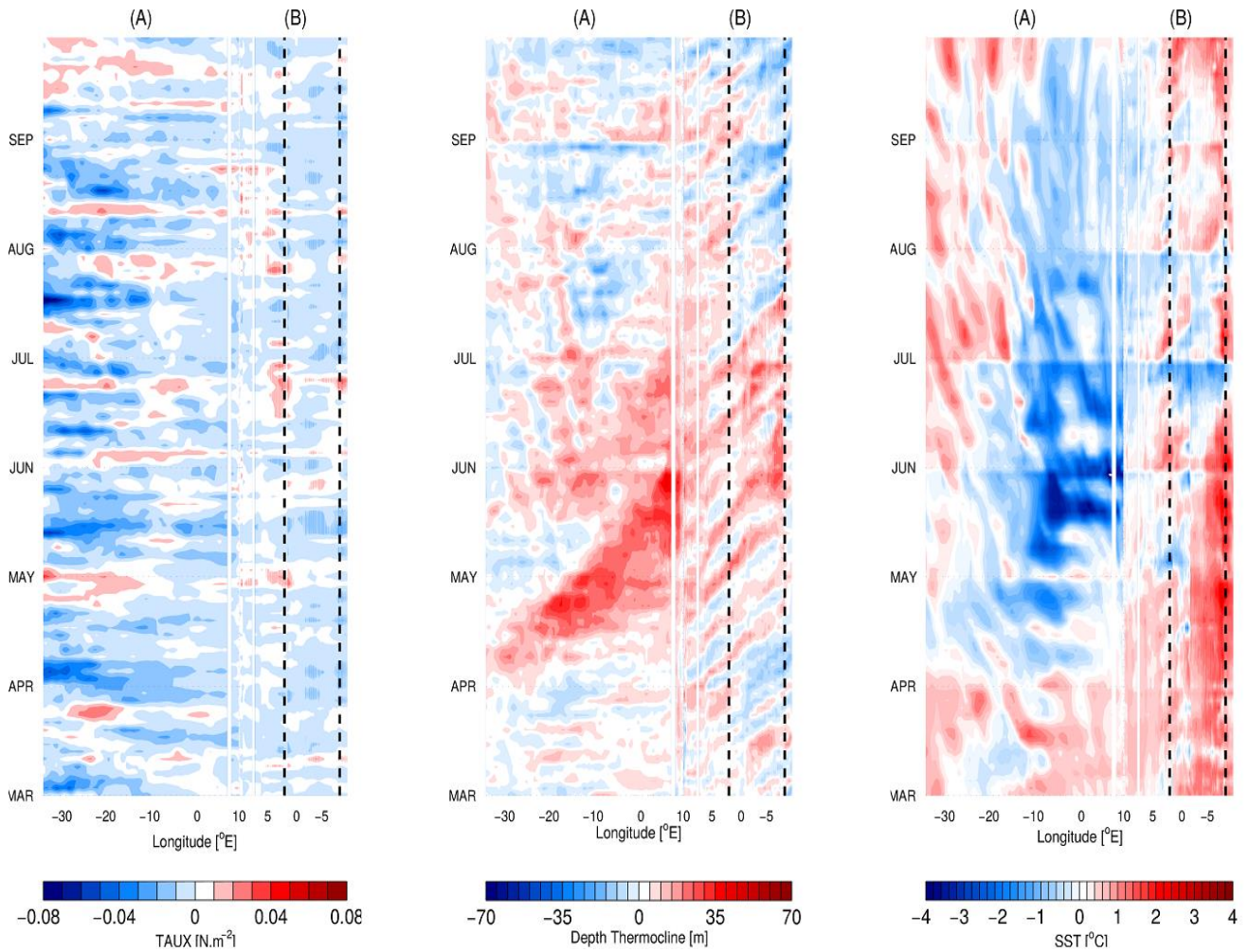
anomalies de profondeur de la thermocline à la côte Nord du Golfe de Guinée ont des vitesses de phases moyennes de  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ . Ces résultats se rapprochent de ceux de l'étude de Aman et al. [18] qui avaient trouvé un signal de propagation de l'upwelling de  $0,7 \text{ m s}^{-1}$ .

On ne retrouve pas d'évidence de propagation de signaux ondes de Kelvin à l'équateur en SST comme on l'avait observée au niveau de la profondeur de la thermocline. On retrouve plutôt des signaux d'ondes en SST se propageant d'Est en Ouest avec des vitesses de propagation comprises entre  $0,32 \text{ m s}^{-1}$  et  $0,38 \text{ m s}^{-1}$ . Ces vitesses sont cohérentes avec les vitesses de propagation des ondes d'instabilités tropicales en Atlantique tropical. En effet, Marin et al. [34] ont observé la propagation de signaux en SST à partir du produit TRMM/TMI de l'ordre de  $0,42 \text{ m s}^{-1}$  entre mai et octobre 2001. On peut ainsi dire que les ondes de Kelvin équatoriales et côtières jouent un rôle dans le processus de propagation d'Est en Ouest de la profondeur de la thermocline. Cependant aucune évidence de propagation de ces ondes n'est visible en SST. Les ondes équatoriales et côtières transporteraient plutôt juste un signal d'ajustement de la structure thermique à échelle du bassin comme l'avaient suggéré [21] et [38].

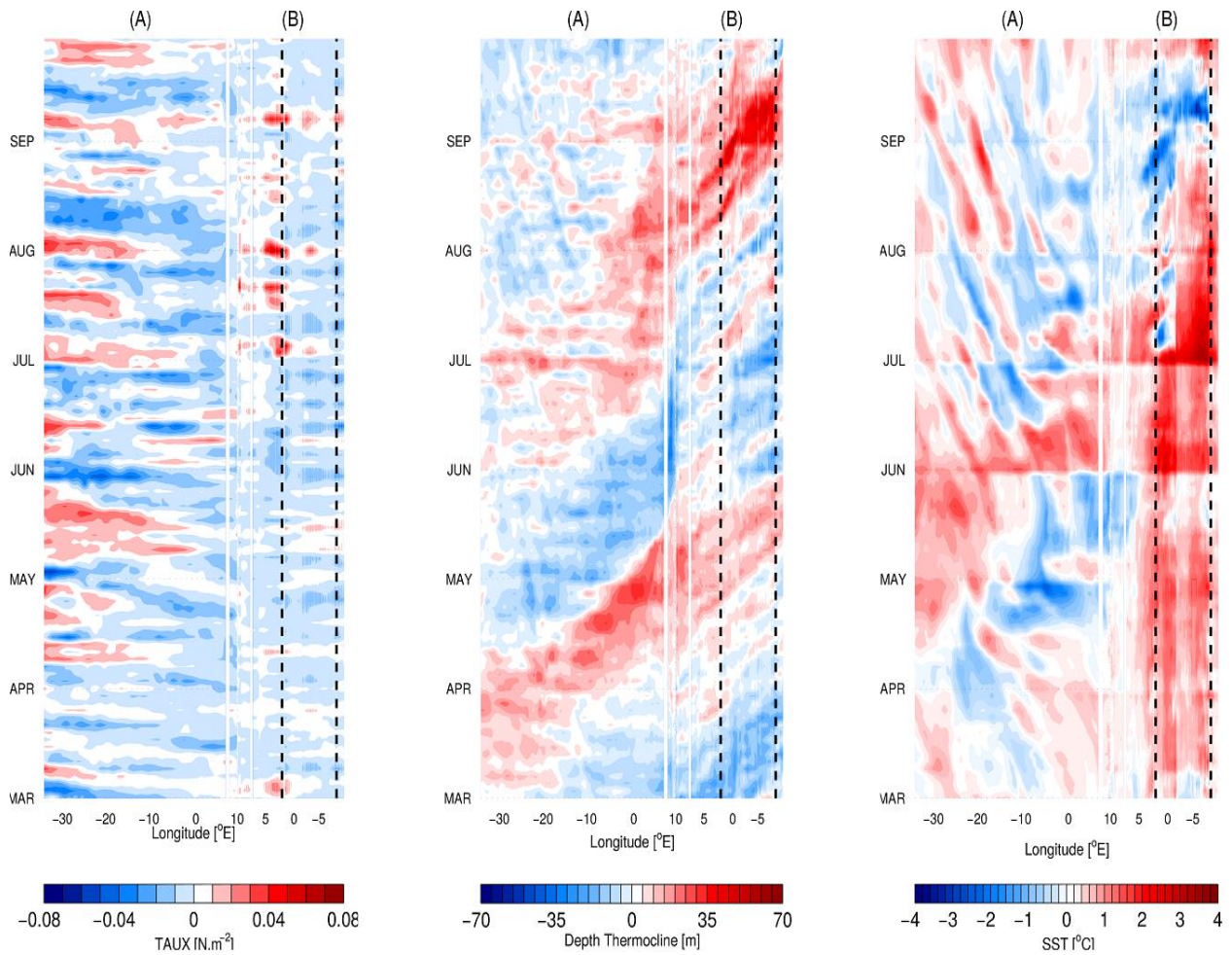




**Fig. 8.** Carte longitude-temps des anomalies de la tension de vent zonale [ $\text{N m}^{-2}$ ], de la profondeur de la thermocline [m] et de la température de surface de la mer [ $^{\circ}\text{C}$ ] le long de l'équateur de  $35^{\circ}\text{W}$  à  $10^{\circ}\text{E}$  (A) et le long de la côte Nord du Golfe de Guinée de  $10^{\circ}\text{E}$  à  $9^{\circ}\text{W}$  (B) en 2004. L'intervalle entre les contours est  $0,01 \text{ N m}^{-2}$ , de 5 m pour la profondeur de la thermocline et de  $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  pour la température de surface de la mer. La ligne tiretée noire à  $7,7^{\circ}\text{W}$  (respectivement à  $2^{\circ}\text{W}$ ) représente la longitude du Cap des Palmes (respectivement du Cap des Trois Pointes).



**Fig. 9.** Carte longitude-temps des anomalies de la tension de vent zonale [ $\text{N m}^{-2}$ ], de la profondeur de la thermocline [m] et de la température de surface de la mer [ $^{\circ}\text{C}$ ] le long de l'équateur de 35°W à 10°E (A) et le long de la côte Nord du Golfe de Guinée de 10°E à 9°W (B) en 2005. L'intervalle entre les contours est 0,01  $\text{N m}^{-2}$ , de 5 m pour la profondeur de la thermocline et de 0,2 $^{\circ}\text{C}$  pour la température de surface de la mer. La ligne tiretée noire à 7,7°W (respectivement à 2°W) représente la longitude du Cap des Palmes (respectivement du Cap des Trois Pointes).



**Fig. 10.** Carte longitude-temps des anomalies de la tension de vent zonal [ $\text{N m}^{-2}$ ], de la profondeur de la thermocline [m] et de la température de surface de la mer [ $^{\circ}\text{C}$ ] le long de l'équateur de  $35^{\circ}\text{W}$  à  $10^{\circ}\text{E}$  (A) et le long de la côte Nord du Golfe de Guinée de  $10^{\circ}\text{E}$  à  $9^{\circ}\text{W}$  (B) en 2006. L'intervalle entre les contours est  $0,01 \text{ N m}^{-2}$ , de 5 m pour la profondeur de la thermocline et de  $0,2^{\circ}\text{C}$  pour la température de surface de la mer. La ligne tiretée noire à  $7,7^{\circ}\text{W}$  (respectivement à  $2^{\circ}\text{W}$ ) représente la longitude du Cap des Palmes (respectivement du Cap des Trois Points).

## 4 Conclusion

Dans cette étude, une simulation interannuelle RefCFSR forcée par les vents de hautes fréquences CFSR et la réanalyse SODA2 aux frontières a été conduite. Cette simulation a pour but d'analyser l'action des ondes de Kelvin équatoriales et côtières sur le processus de génération de l'upwelling côtier. L'état moyen des principales composantes de la SST est relativement bien représenté. En dépit des biais chauds de SST observés, par ailleurs comme pour la majorité des simulations en interannuelle dans l'Atlantique tropical, nous avons estimé que les sorties de cette simulation peuvent être utilisées pour notre analyse.

Cette évaluation nous a permis de mettre aussi en évidence que selon les années, la variabilité du grand upwelling à l'Est du Cap des Palmes définit par la zone WGC [4°N-5,5°N; 7,5°W-6°W] et celle du grand upwelling à l'Est du Cap des Trois Pointes définie par la zone EGC [4°N-5,5°N; 2°W-0,5°W] pouvaient être différentes.

Les différences entre les spectres d'énergie des anomalies interannuelles de la SST de ces différentes zones ont conforté ces résultats. En effet, l'analyse spectrale suggère que la dynamique des processus physiques gouvernant la SST dans ces deux zones est soit différente ou que l'influence des processus océaniques agit de manière différente. Tous ces résultats montrent bien que le processus de génération de l'upwelling à l'Est du Cap des Palmes est différent de celui à l'Est du Cap des Trois Pointes.

L'analyse des anomalies de la profondeur de la thermocline en 2004, 2005

et en 2006 nous a permis de mettre en évidence la propagation d'ondes de vitesses correspondantes à des ondes de Kelvin équatoriales et côtières du 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres barocline de l'équateur à la côte Nord du Golfe de Guinée. Au niveau de la SST, aucune évidence de propagation d'ondes de Kelvin équatoriales et côtières n'est visible alors qu'une signature de ces ondes avait été notée au niveau de la thermocline. Aucune continuité entre la propagation du signal d'upwelling le long de l'équateur et l'upwelling du Golfe de Guinée n'est visible en SST comme certaines études antérieures menées à partir d'observations le suggéraient. Ce qui suggère que l'effet du forçage à l'Ouest du bassin par la propagation des ondes équatoriales et côtières transporterait plutôt juste un signal d'ajustement de la structure thermique à échelle du bassin. Quant au signal de propagation d'Ouest en Est de l'upwelling côtier, il pourrait être aussi attribué à l'effet de vent local. Le signal de ces ondes est transitoire, et influence l'upwelling côtier plutôt que de le générer. En perspective de cette étude, une analyse comparative de sorties de modèles réaliste et idéalisée (sans les ondes de Kelvin équatoriales) est envisagée. Il s'agira de quantifier leur influence sur l'upwelling côtier du Golfe de Guinée.

## Références bibliographiques

- [1] R. Weisberg, C. Colin, *Equatorial Atlantic Ocean temperature and current variations during 1983-1984*, Nature 322 (1986) 240-243.
- [2] G. Caniaux, H. Giordani, J.-L. Redelsperger, F. Guichard, E. Key M. Wade, *Coupling between the Atlantic*

- cold tongue and west African monsoon in boreal spring and summer*, J. Geophys. Res. 116(C04003) (2011) 1-17. doi:10.1029/2010JC006570
- [3] S. Djakouré, P. Penven, B. Bourlès, V. Koné, J. Veitch, *Respective roles of the Guinea Current and local winds on the coastal upwelling in the northern Gulf of Guinea*, Journal of Physical Oceanography 47 (2017) 1367–1387.
- [4] Y. Opoku-Ankomah, I. Cordery, *Atlantic sea surface temperatures and rainfall variability in Ghana*, J. Clim. 7 (1994) 551–558.
- [5] P. Brandt, G. Caniaux, B. Bourlès, A. Lazar, M. Dengler, A. Funk, V. Hormann, H. Giordani, F. Marin, *Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the west African monsoon*, Atmos. Sci. Let. 12 (2011) 24–30. doi:10.1002/asl.287
- [6] E. Ali, K.Y. Kouadio, E.P. Zahiri, A. Aman, A.P. Assamoi, B. Bourlès, *Influence of the Gulf of Guinea coastal and equatorial upwellings on the precipitations along its northern coasts during the boreal summer period*, Asian J. Applied Sci. 4(3) (2011) 271-285.
- [7] N.J. Hardman-Mountford, J.M. McGlade, *Seasonal and interannual variability of oceanographic processes in the Gulf of Guinea: an investigation using AVHRR sea surface temperature data*, Int. J. Remote Sensing 24(16) (2003) 3247–3268.
- [8] S. Philander, R. Pacanowski, *The mass and heat budget in a model of the tropical Atlantic Ocean*, J. Geophys. Res. 91(14) (1986) 212–214.
- [9] A. Peter, Variabilité de la température de la couche de mélange en Atlantique équatorial aux échelles saisonnières à interannuelles, à l'aide de simulations numériques, Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse III, France (2007).
- [10] E. Toualy, G. Stanojevic, K. Kouadio, A. Aman, *Multi-decadal variability of sea surface temperature in the northern coast of the Gulf of Guinea*, Asian J. of Applied Sci. 5(8) (2012) 552-562.
- [11] E. Toualy, Variabilité temporelle de l'upwelling côtier au nord du Golfe de Guinée, Ph.D. thesis, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire (2013).
- [12] D. Binet, J. Servain, *Have the recent hydrological changes in the northern Gulf of Guinea induced the sardinella aurita outburst?*, Oceanol. Acta 16 (1993) 247–260.
- [13] T. Matsuno, *Quasi-geostrophic motions in the equatorial area*, J. Meteorol. Soc. Jpn 44 (1966) 25–43.
- [14] S.G.H. Philander, El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation (Vol. 46) (International Geophysics, Vol. 46), Academic Press, 1st edition (1989).
- [15] D.W. Moore, Planetary-gravity waves in an equatorial ocean, Ph.D. thesis, Harvard Univ., Cambridge, Mass. (1968).
- [16] Y. Du Penhoat, A.M. Tréguier, *The seasonal linear response of the Atlantic Ocean*, J. Phys. Oceanogr. 15 (1985) 316-329. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0316:TSLROT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0316:TSLROT>2.0.CO;2)
- [17] I. Polo, A. Lazar, B. Rodriguez-Fonseca, S. Arnault, *Oceanic Kelvin*

- waves and tropical Atlantic intraseasonal variability: 1. Kelvin wave characterization*, J. Geophys. Res. 113 C07009 (2008) 1-18.  
<https://doi.org/10.1029/2007JC004495>
- [18] A. Aman, L. Testut, P. Woodworth, T. Aarup, D. Dixon, *Seasonal Sea level Variability in the Gulf of Guinea from altimetry and Tide Gauge*, Rev. Ivoir. Sci. Technol. 09 (2007) 105-118.
- [19] T. Mitchodigni, Propagation d'ondes côtières interannuelles le long de la côte Nord du Golfe de Guinée. Master, Université Abomey-Calavi, Bénin et Université Paul Sabatier, Toulouse, France (2022).
- [20] J. Servain, J. Picaut, J. Merle, *Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic ocean*, J. Phys. Oceanogr. 12 (1982) 457-463.
- [21] J. Picaut, *Propagation of the seasonal upwelling in the eastern equatorial Atlantic*, J. Phys. Oceanogr. 13(1) (1983) 18-37.
- [22] W. Moore, P. Hisard, J. McCreary, J. Merle, J. O'Brien, J. Picaut, J. Verstraete, C. Wunsch, *Equatorial adjustment in the eastern Atlantic ocean*, Geophys. Res. Lett. 5 (1978) 637-640.
- [23] A. Clarke, *On the generation of the seasonal coastal upwelling in the Gulf of Guinea*, J. Geophys. Res. 84 (1979) 3743-3751.
- [24] A. Shchepetkin, J. McWilliams, *The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model*, Ocean Modell. 9 (2005) 347-404.
- [25] L. Debreu, P. Marchesiello, P. Penven, G. Cambon, *Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation*, Ocean Modell. 49-50(0) (2012) 1-21.  
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003>
- [26] L. Debreu, E. Blayo, *Two-way embedding algorithms: A review*, Ocean Dyn. 58 (2008) 415-428.
- [27] S. Djakouré, P. Penven, B. Bourlès, J. Veitch, V. Koné, *Coastally trapped eddies in the north of the Gulf of Guinea*, J. Geophys. Res. Oceans 119 (2004) 6805-6819.  
 doi :10.1002/2014JC010243
- [28] S. Saha et al., *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*, Bull. Amer. Meteor. Soc. 91(8) (2010) 1015-1057.  
<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- [29] J.A. Carton, G.A. Chepurin, X. Cao, B.S. Giese, *A Simple Ocean Data Assimilation analysis of the global upper ocean 1950-95 Part I: Methodology*, J. Phys. Oceanogr. 30 (2000) 294309.
- [30] J.A. Carton, B. Giese, S. Grodsky, *Sea level rise and the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis*, J. Geophys. Res. 110(C09006) (2005) 1-8.  
 doi: 1029/2004JC002817
- [31] J.A. Carton, B.S. Giese, *A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA)*, Mon. Weather Rev. 136 (2008) 29993017.
- [32] A. Morlière, *Les saisons marines devant Abidjan*, Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan 1 (1970) 1-15.

- [33] S. Djakouré, Analyse numérique de la circulation océanique de la région Nord du Golfe de Guinée, Thèse de la Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA-Chaire UNESCO) Université d'Abomey-Calavi, Bénin (2015).
- [34] F. Marin, G. Caniaux, B. Bourlès, H. Giordani, Y. Gouriou, E. Key, *Why were sea surface temperature so different in the eastern equatorial Atlantic in June 2005 and 2006?* J. Phys. Ocean. 39 (2009) 1416–1431. doi:10.1175/2008JPO4030.1
- [35] W. Moore, P. Hisard, J. McCreary, J. Merle, J. O'Brien, J. Picaut, J. Verstraete, C. Wunsch, *Equatorial adjustment in the eastern Atlantic Ocean*, Geophys. Res. Lett. 5 (1978) 637–640.
- [36] S. Illig, B. Dewitte, N. Ayoub, Y. du Penhoat, G. Reverdin, P. D. Mey, F. Bonjean, G. Lagerloef, *Interannual Long Equatorial Waves in the Tropical Atlantic from a High Resolution Ocean General Circulation Model Experiment in 1981-2000*, J. Geophys. Res. 109(C02022) (2004) 1-23. doi:10.1029/2003JC001771
- [37] G. Athié, F. Marin, A.-M. Tréguier, B. Bourlès, C. Guiavarc'h, *Sensitivity of near-surface Tropical Instability Waves to submonthly wind forcing in the tropical Atlantic*, Ocean Modell. 30(4) (2009) 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.06.016>
- [38] C. Colin, *Coastal upwelling events in front of the Ivory Coast during the FOCAL program*, Oceanol. Acta 11(2) (1988) 125–138.