ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SAISONNIÈRE ET INTERANUELLE DE LA RÉSURGENCE DE LA GUAJIRA (COLOMBIE) PAR ANALYSE DE DONNÉES SATELLITAIRES AMI-WIND, SEAWINDS ET AVHRR

Caroline PETUS[1], Carolina GARCIA VALENCIA[2], Yves François THOMAS[3] et Marcella CESARACIO[3]

[1] UMR CNRS 5805 EPOC, Université de Bordeaux 1, avenue des Facultés, 33405 Talence, cedex, France.
Téléphone : (33) 5 40 00 88 67 ; télécopieur : (33) 5 56 84 08 48 ; courriel : c.petus@epoc.u-bordeaux1.fr
[2] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Apartado Aereo 1016, Cerro Punta Betín Santa Marta, Colombia.
Téléphone : (57) 5 4214774 ; télécopieur : (57) 5 43 12 986 ; courriel: cgv@invmar.org.co
[3] UMR CNRS 8591 LGP, Université de Paris 1, 1, place Aristide-Briand, 92195 Meudon, cedex, France.
Téléphone : (33)1 45 07 55 56 ; télécopieur : (33) 1 45 07 58 30 ;
courriel : thomas@cnrs-bellevue.fr ; cesaracccio@cnrs-bellevue.fr

Soumis le 22 février 2007 ; révisé le 3 avril 2007 ; accepté le 6 septembre 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 143-156

Résumé

La péninsule de la Guajira, localisée à l'extrême nord-ouest de la Colombie, est soumise à l'influence des alizés du nord qui soufflent quasi-parallèlement à la côte tout au long de l'année et sont responsables de la mise en place d'une résurgence. L'étude de la résurgence de la Guajira a été effectuée par exploitation de données satellitaires. Elle s'appuie sur l'utilisation de deux bases de données s'étendant respectivement sur 20 à 15 ans : les images AVHRR de NOAA (1985 à 2005), d'une part, et les données des diffusiomètres AMI-Wind de ERS-1 et 2 (1991 à 2000) ainsi que de SeaWinds de QuikScat (1999 à 2005), d'autre part. La présence de la résurgence est facilement repérable sur les images AVHRR à cause d'une auréole de plus faible température de surface. Afin de caractériser sa variabilité, la vitesse et la direction du vent ainsi que les températures minimale et moyenne, un index de résurgence ainsi que l'extension de la résurgence sont systématiquement déterminées le long de profils s'étendant des littoraux de la Guajira et du Venezuela à ceux d'Haïti et de la République Dominicaine. À l'échelle saisonnière, la mise en place de la résurgence est directement liée à l'intensité des alizés côtiers (contrôlée par le mouvement méridional de la zone intertropicale de convergence – ZITC), combinée à leur orientation par rapport à la côte. Lors de la saison des vents, de décembre à février, la ZITC est localisée à sa position la plus sud (0-5° S), les alizés ont une forte intensité et soufflent parallèlement à la côte. En réponse, le signal de la résurgence, faible en décembre, augmente jusqu'en février où l'intensité et l'extension de la résurgence sont maximales. Pendant la saison de transition, les alizés côtiers faiblissent et leur direction de provenance s'oriente vers l'est. La réponse océanique se réduit en parallèle de mars à mai où la présence de la résurgence devient occasionnelle. Bien que la force des alizés soit supérieure à celle de la saison des vents, la reprise de la résurgence s'observe rarement pendant le « Veranillo ». Enfin, la saison des pluies s'accompagne d'une migration de la ZITC vers le nord (10-12° N), responsable de la diminution de l'intensité des alizés côtiers d'août à octobre. Ils possèdent alors l'orientation la moins parallèle aux côtes de la Guajira et le stress du vent minimal est insuffisant pour construire la résurgence. À l'échelle interannuelle, la résurgence montre de fréquentes variations pouvant être mises en relation avec les évènements de l'El Nino Southern Oscillation (ENSO) du Pacifique. Les phénomènes El Niño se traduisent systématiquement par une diminution des alizés côtiers l'année suivant leur apparition dans l'océan Pacifique. Cette interconnexion Pacifique-Caraïbes est particulièrement bien illustrée, en 1998, par une diminution maximale des alizés faisant suite au fort évènement El Niño de 1997. En réponse à l'affaiblissement du stress atmosphérique, l'intensité de la résurgence se réduit quasi-systématiquement. Au contraire, les années suivant les événements La Niña, de 1996, 1998 et 1999, montrent une reprise de l'intensité des alizés côtiers et en réponse, celle de l'intensité de la résurgence.

Mots-clés : Colombie, Guajira, Alizés, résurgence, ENSO, télédétection, AMI-Wind, SeaWinds, NOAA.

Study of the seasonal and interannual variability of the Guajira upwelling (Colombia) based on the analysis of AMI-Wind, SeaWinds and AVHRR satellite data

The Guajira peninsula, located in the North-West of Colombia, is subject to Northern Trade Winds blowing quasi-parallel to the coast all along the year, at the origin of the set up of an upwelling. The study on Guajira upwelling was carried out using remote sensing data. It is based on the use of two databases that cover respectively twenty and fifteen years. The first database is constituted of NOAA AVHRR images from 1985 to 2005, and the second by ERS-1 and 2 AMI-Wind scatterometer data from 1991 to 2000, as well as QuikScat Sea Winds data from 1999 to 2005.The presence of the upwelling can easily be detected on NOAA AVHRR images due to a halo corresponding to lower sea surface temperatures. In order to define the upwelling variability, the speed and direction of the wind, the lowest and mean temperatures, an upwelling index and the upwelling extension were systematically determined along several sections from Guajira and Venezuela coasts to the Haiti and Dominican Republic coasts. On a seasonal scale, the upwelling presence is directly linked to the Northern Trade Winds intensity (which is mainly controlled by the southern movements of the IZTC) and their orientation to the coast. During the wind season, from December to February, the IZTC is located in its extreme Southern position (0-5° S), and the Northern Trade Winds reach their maximum intensity and blow parallel to the coast. Consequently, the upwelling signal, low in December, increases until February when the resurgence intensity and extension are maximum. During the transition season, the Northern Trade Winds weaken and their orientation is mainly in an easterly direction. In parallel, the oceanic response is reduced from March to May when the upwelling is more rarely observed. Although the force of the Northern Trade Winds is highest to the one occurring during the wind season, the resumption of the upwelling is rarely observed during the "Veranillo". Finally, the rain season is accompanied by IZTC migration northwards (10-12° NR), leading to a reduction in the intensity of the Northern Trade Winds from August to October. Then, the winds are less oriented parallel to the coasts of the Guajira and the strength of the minimal wind is insufficient to induce upwelling formation. On an interannual scale, the upwelling shows frequent variations possibly linked to ENSO events in the Pacific. El Niño phenomena result systematically in a reduction in the Northern Trade Winds, the year following their appearance in the Pacific Ocean. This Pacific-Caribbean interconnection is especially illustrated in 1998 by a maximum reduction in the trade winds following the strong El Niño event of 1997. In addition, the weakening of the atmospheric forcing induces a quasi automatic lower upwelling intensity. Conversely, the years following the Niña events of 1996, 1998 and 1999 show a resumption of the Northern Trade Winds intensity and therefore upwelling intensity.

Key words : Colombia, Guajira, Northern Trade Winds, Upwelling, ENSO, Remote sensing, AMI-Wind, SeaWinds, NOAA.

1. INTRODUCTION

La Colombie caribéenne est localisée à l'extrême nord-ouest de la Colombie (figure 1). Un tiers de ses côtes correspond à la péninsule de la Guajira qui s'étend sur 600 km, de Puerto Cumarebo (69° O, Venezuela) à la Sierra Nevada de Santa Marta (74° O, Colombie). Elle pénètre au sein de la mer des Caraïbes jusqu'à 12° N.

Du fait de sa position géographique, la péninsule est soumise à l'influence des alizés du Nord. Ces vents accélèrent dans le centre du bassin des Caraïbes et forment un jet de faible altitude (*low-level jet* – LLJ) qui constitue la partie inférieure d'une cellule de circulation atmosphérique de type cellule de Walker. Celle-ci est constituée d'une zone de convergence au-dessus des terres d'Amérique Centrale et d'une zone de divergence dans le centre du bassin des Caraïbes (Andrade, 2000). Au niveau de la péninsule colombienne, le jet s'étend jusqu'aux côtes de la Guajira (Petus, 2006) et de puissants alizés soufflent quasi-parallèlement à la côte tout au long de l'année. Ils sont responsables de la mise en place de la résurgence de la Guajira (Andrade, 2000 ; Andrade and Barton, 2005 ; Petus, 2006). L'intensité des vents est modulée saisonnièrement par la position de la zone intertropicale de convergence (ZITC) de part et d'autre de l'Équateur. Le climat de la Guajira est ainsi caractérisé par une saison des vents, de décembre à février, et une saison des pluies, d'août à novembre, où la force des alizés diminue. Le reste de l'année est considéré comme une saison de transition, bien qu'interrompue par une reprise des vents de courte durée, de juin à juillet, connue sous le nom de « Veranillo » ou « petit été » (Corredor, 1981 ; Pujos *et al*., 1986 ; Andrade, 2000 ; Andrade and Barton, 2005 ; Petus, 2006).

La remontée d'eaux profondes froides d'une résurgence s'accompagne de l'apport en nutriments dans la couche euphotique qui favorise la production biologique. Les zones de résurgence sont ainsi connues comme les zones les plus poissonneuses de l'océan mondial et présentent un intérêt économique majeur. Dans le bassin des Caraïbes particulièrement pauvre en nutriments (Corredor, 1979), la résurgence de la Guajira peut jouer un rôle biologique primordial. La compréhension de son influence apparaît donc nécessaire. Bien que sa présence soit rapportée de longue date (Fajardo, 1978), les études la caractérisant restent peu nombreuses et basées sur des données *in situ* de faible couverture spatio-temporelle (Corredor, 1979 et 1981).

Le développement de l'imagerie satellitaire et le libre accès aux données permettent aujourd'hui l'utilisation des données de télédétection comme outil efficace pour la caractérisation des phénomènes océaniques à grande échelle spatiotemporelle. Cependant, seuls Andrade (2000), puis Andrade et Barton (2005), s'appuient sur l'imagerie satellitaire

pour décrire le système de résurgence de la Guajira. Notre étude est donc la première qui repose sur l'exploitation systématique de la télédétection à grande échelle spatiale et temporelle.

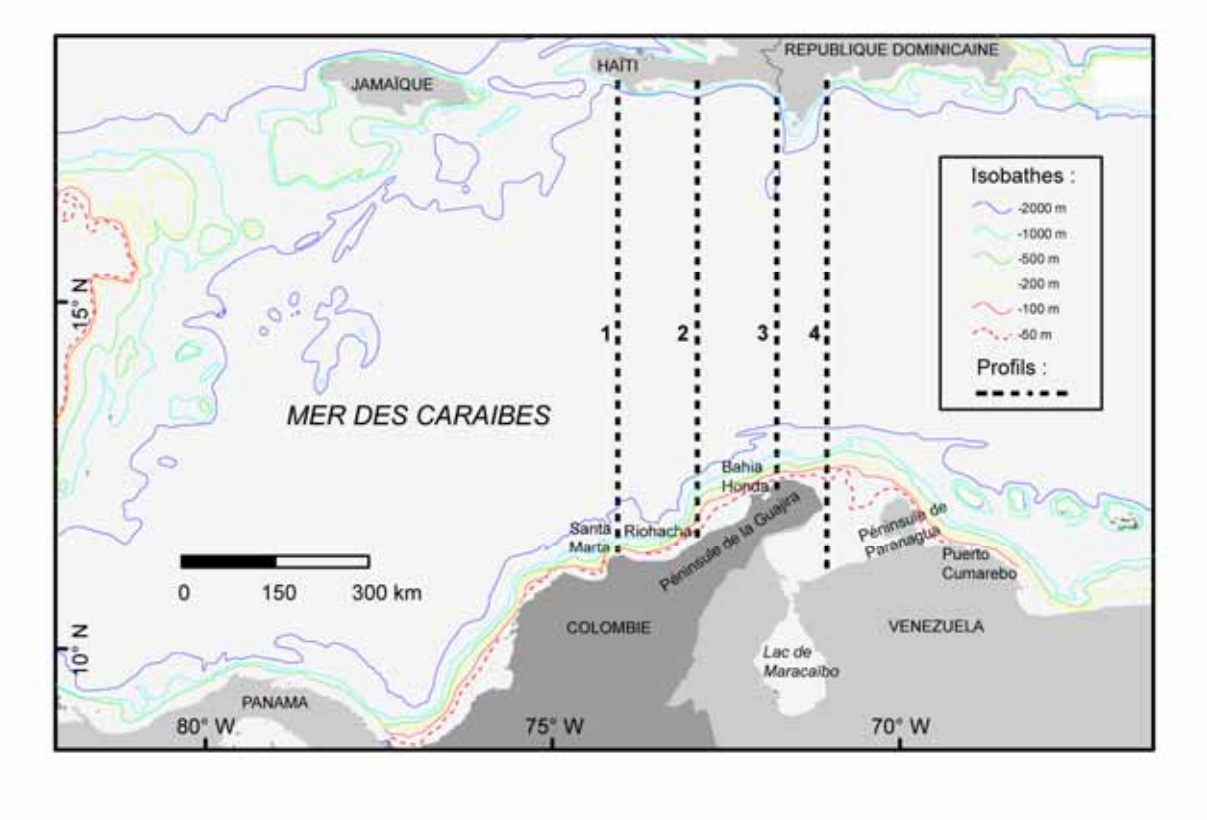


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude. *Location of the study area.*

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La péninsule de Guajira forme l'extrémité septentrionale de la côte du nord-ouest de l'Amérique du Sud et s'avance dans les Caraïbes centrales au delà de 12° de latitude nord. Elle est bordée par la Sierra Nevada de Santa Marta au sud, la mer des Caraïbes au nord et à l'ouest ainsi que le golfe du Venezuela au sud-est. Une grande partie de la péninsule se situe au nord-est de la Colombie et l'autre appartient au nord-ouest du Venezuela (figure 1).

Cette région peu élevée, dont les altitudes culminent à quelques centaines de mètres, est plane et désertique ; les précipitations y sont de l'ordre de 300 mm.an^{-1}. Elle s'étend sur plus de 600 km, depuis Santa Marta (74° O) en Colombie jusqu'à Puerto Cumarebo (69° O) au Venezuela.

Les péninsules de Guajira et de Paraguaná entourent le golfe du Venezuela, dont les profondeurs sont inférieures à 200 m, golfe dans lequel débouche le lac de Maracaibo.

2.1. Hydrographie de la plate-forme et de la pente continentale

Le littoral de la Guajira présente une orientation d'ensemble ENE-OSO. Au large, le plateau continental est relativement étroit. Au nord de la péninsule, l'isobathe des 200 m se situe à environ 20 km de la côte. Plus à l'ouest, la plate-forme s'élargit pour atteindre un maximum d'environ 50 km dans la région de Riohacha. Plus à l'ouest encore, au droit de Santa Marta, la plate-forme disparaît pratiquement. Elle ne réapparaît qu'aux abords de Barranquilla, où elle atteint une largeur de 20 km. La topographie de la plate-forme proprement dite est le plus souvent peu accidentée (NORAD /UNDP/FAO, 1988 ; CIOH, 2000).

2.2. Climatologie du domaine océanique

Le climat de la Guajira est caractérisé par une saison des vents, de décembre à février, et une saison des pluies, d'août à novembre, où la force des alizés diminue. Le reste de l'année est considéré comme une saison de transition, interrompue seulement par une reprise de courte durée des vents, entre juin et juillet, connue sous le nom de « Veranillo ».

Les vents alizés du nord à la côte ont pu être décrits au large de la Guajira par interprétation d'une séquence d'observation du champ de vent moyen hebdomadaire (voir la section 3.1.1.) pour la période comprise entre août 1991 et septembre 2006 au point de coordonnées : 72° 30' O par 12° 30' N.

La vitesse moyenne du vent est voisine de 9 m s^{-1} en janvier et février, puis diminue jusqu'à 8,2 m s^{-1} en mai avant de croître à nouveau jusqu'à 9,6 m s^{-1} en juin puis de diminuer à nouveau jusqu'à 6,6 m s^{-1} en octobre. La direction moyenne du vent demeure stable entre 73° et 86° tout au long de l'année. À quatre épisodes de vent près, tous les vents proviennent du secteur 50 ° à 100°. De fait, les vents ont une direction presque parallèle au trait de côte tout au long de l'année.

2.3. Hydrologie du domaine océanique

Le système montre les dispositifs caractéristiques d'une résurgence côtière, favorisé par l'orientation locale de la côte par rapport aux vents prédominants. Un intense courant côtier orienté vers l'ouest atteint des vitesses supérieures à 1 ms^{-1}, dans la couche d'eau proche de la surface, et un courant de fond orienté vers l'est au-dessus de la pente continentale, avec des vitesses pouvant atteindre 0,2 m s^{-1} à la profondeur de 200 m, ont été observés à trois époques distinctes de l'année (Andrade *et al*., 2003). Le courant de fond semble appartenir à un courant continu le long des côtes d'Amérique du Sud, en mer des Caraïbes (Andrade and Barton, 2005). À la limite occidentale du centre de la résurgence de la Guajira, d'après les mêmes auteurs, un écoulement de retour faible forme une circulation cyclonique possiblement permanente localisée entre l'axe du courant et la côte de Guajira.

Au nord-est, les eaux superficielles du bassin de Colombie peuvent être saisonnièrement affectées, en période de résurgence notamment, par les eaux polyhalines (salinité comprise entre 18 et 30 ‰) du fleuve Orénoque. À l'est, les eaux superficielles du golfe du Venezuela sont susceptibles d'être affectées par les eaux du lac de Maracaibo dont la salinité, la température, la turbidité et la productivité varient en fonction du régime hydrographique du lac.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Matériel

Deux bases de données ont été utilisées pour réaliser cette étude, l'une concerne la température de surface de l'océan et l'autre le champ de vent moyen.

Pour chaque base de données est retenue une fenêtre délimitée au sud par le littoral caribéen de la Colombie et du Venezuela, à l'est par le littoral du Nicaragua et au nord par le sud de la Jamaïque, d'Haïti et de la République Dominicaine, soit un secteur s'étendant de 83° 58' 48,17'' O et 19° 00' 39,56'' N à 68° 59' 38,91'' O et 07° 00' 39,56'' N.

3.1.1. Champ de vent moyen

Le champ de vent moyen plus connu sous l'abréviation MWF (Mean Wind Fields) a été décrit par emploi des données traitées et archivées par le Centre ERS d'archivage et de traitement (CERSAT, 2007**)**. Les données retenues sont celles des diffusiomètres AMI-Wind opérant en bande C, à la fréquence de 5,3 GHz, et embarqués sur les satellites ERS-1 et 2 et celles du diffusiomètre SeaWinds opérant en bande Ku, à la fréquence de 13,4 GHz, et embarqué sur le satellite QuikScat. Ces capteurs, bien que différents dans leur principe de fonctionnement, mesurent la vitesse du vent entre 3 et 20 m s^{-1} avec une précision de 2 m s^{-1} et la direction avec une exactitude de l'ordre de 20 degrés.

Les données utilisées pour ce travail sont les données maillées du champ de vent global moyenné sur une période d'un mois à la résolution de 1° x 1° pour les diffusiomètres AMI-Wind et à la résolution de 0,5 x 0, 5° pour le diffusiomètre SeaWinds. Les données AMI-Wind ont été retenues pour la période comprise entre août 1991 et juin 1999 et les données SeaWinds pour la période de juillet 1999 à octobre 2005.

3.1.2. Températures de surface de l'océan

La température de surface de l'océan, plus connue sous l'abréviation SST (*Sea Surface Temperature*) a été décrite à l'aide de données traitées et archivées par le National Oceanographic Data Center et la Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science de l'Université de Miami dans le cadre du projet « The 4 km AVHRR Pathfinder Version 5.0 SST » (NODC, 2006).

Les données utilisées pour ce travail sont les données de la température nocturne de surface de l'océan, estimée à partir d'un algorithme multibande des radiomètres AVHRR de NOAA-9, 11, 14, 16 et 17 (Vazquez *et al*., 1998). Elles sont maillées à la résolution de 4,6 km et moyennées sur une période d'un mois. Les données AVHRR ont été retenues pour la période comprise entre janvier 1985 et octobre 2005.

3.2. Méthodes

L'étude des variations spatiotemporelles d'une résurgence passe, en premier lieu, par l'identification du comportement de la température des eaux superficielles dans la zone d'influence de la résurgence. Tel que défini par Demarcq et Faure (2000), cette zone peut être clairement identifiée sur les images AVHRR comme une « auréole » d'eaux froides, de direction générale parallèle à la côte, possédant un minimum de température pouvant être séparé du littoral, et dont le signal décroît vers le large (figure 2). Afin de caractériser la dynamique de la résurgence, quatre profils nord-sud ont été réalisés sur chacune des images satellitaires, des littoraux de la Guajira et du Venezuela à ceux d'Haïti et de la République Dominicaine. Les profils I à IV sont respectivement situés au droit de Santa Marta, de Ríohacha, de Bahia Honda et de l'ouest de la péninsule du Paraguaná. Ils sont de longueur similaire, respectivement 735, 712, 630 et 760 km (figure 2).

L'influence des remontées d'eaux froides est étudiée dans un premier temps grâce au calcul de la température moyenne des eaux superficielles (SST_{moy}), puis grâce au relevé de la température minimale (SST_{min}) le long de chaque transect.

La limite d'extension de la résurgence peut être définie comme le maximum de gradient de température le long des profils (Demarcq and Faure, 2000). Son calcul, ainsi que l'analyse systématique de l'ensemble des cartes mensuelles de SST permet de fixer la valeur de 26,3 °C comme caractéristique de l'extension de la résurgence. Ce gradient a été choisi comme valeur de référence au mois du maximum de la résurgence les années normales et sert de valeur de référence. Suivant cette définition, le repérage le long des quatre profils de l'existence de cette température permet une détermination qualitative de la présence/absence de la résurgence. Il est alors possible de calculer le pourcentage de présence de la résurgence (ou pourcentage d'occurrence : OCC) pour un mois et un profil donné, au cours des vingt années étudiées. Sur l'ensemble de la zone, le calcul du pourcentage d'occurrence de la résurgence pour chaque pixel (OCC spatiale) permet de déterminer l'influence géographique globale de la résurgence. Enfin, la localisation de l'isotherme 26,3 °C par rapport à la côte renseigne sur l'extension (EXT) de la résurgence.

Afin de préciser l'intensité de la résurgence, un index de résurgence côtière (IUC) est calculé pour chaque pixel. Ce dernier est choisi pour représenter au mieux l'influence des remontées d'eaux profondes au sein des eaux ambiantes chaudes du bassin colombien et s'appuie sur l'index défini par Demarcq et Faure (2000), tel que :

$$IUC_{SST} = \frac{SST_{\max} - SST_{obs}}{SST_{\max} - SST_{up}}$$

Dans cette formule, SST_{max} représente la température de surface maximale à proximité de la zone de résurgence, SST_{obs} la valeur de SST observée pour un pixel donné et SST_{up} la température des eaux « sources » de la résurgence.

Dans le cas de la résurgence de la Guajira, les eaux sources correspondent aux eaux Nord Atlantiques Subtropicales. Leur valeur SST_{up} est approximée par excès comme la plus basse relevée sur l'ensemble des 20 ans, soit 23,6 °C. La bonne adéquation de cette valeur avec les eaux « sources » de la résurgence a pu être confirmée par les mesures réalisées *in situ*. La valeur SST_{max} est approchée comme la valeur maximale de température de surface enregistrée dans l'aire d'étude, soit 30,4 °C. Les valeurs correspondant aux profils I à IV sont ensuite extraites et l'IUC moyen de chaque transect calculé.

La présence et la variabilité de la résurgence, en termes d'extension et d'intensité, sont à relier aux caractéristiques des vents côtiers (Andrade, 2000 ; Andrade and Barton, 2005 ; Petus, 2006). Pour déterminer le forçage atmosphérique, le calcul de l'intensité moyenne (VIT) et de la direction moyenne (DIR) des alizés est systématiquement réalisé le long de chaque transect sur une zone s'étendant de 10,5° N à 13,5° N.

L'étude statistique des différents indices relevés permet la caractérisation moyenne de la dynamique mensuelle et interannuelle de la résurgence, sous l'influence des alizés.

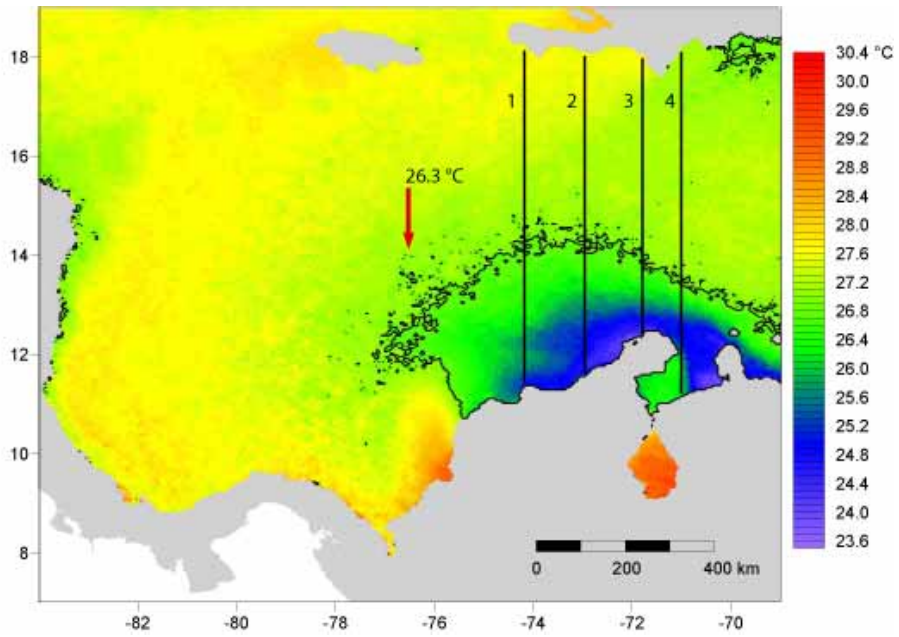


Figure 2 : Comportement caractéristique de la température moyenne mensuelle nocturne de surface de l'océan (moyenne des mois de février) dans la zone de résurgence océanique de la Guajira (Colombie) et localisation des profils I à IV; l'isotherme 26,325° en est souligné par un trait de couleur noire. *Standard behavior of the monthly average of night sea surface temperature (average of the months of February) in the Guajira upwelling (Colombia) and positions of profiles I to IV; the 26,325 °C isotherm is underlined in black.*

4. RÉSULTATS

4.1. Comportement mensuel moyen de la résurgence

Sur la figure 3, on présente les variations mensuelles des indices caractérisant la résurgence, moyennées sur les 20 ans de données. Les différents paramètres montrent des évolutions parallèles et un comportement mensuel fortement corrélé (figure 3e). Les températures minimales et moyennes les plus faibles s'observent au mois de février (de l'ordre de 24,4 °C et 26,6 ± 0,4 °C respectivement) et caractérisent un refroidissement important de la surface de l'océan lié à une forte résurgence. Cette affirmation est vérifiée par un IUC maximal. Les températures augmentent ensuite jusqu'en octobre alors que la température moyenne de surface de l'océan atteint 28,7 ±0,4 °C (IUC minimal). Cet accroissement est légèrement interrompu en juillet et août, bien que les températures restent supérieures à celles observées au mois de mai (IUC inférieur). La résurgence est donc caractérisée par une amplitude thermique mensuelle relativement faible, les valeurs extrêmes des températures variant de l'ordre de 3 °C au cours de l'année.

Pour chacun des indices, les différences entre les profils sont faibles (figure 3a à d). Les températures fluctuent d'environ 0,1 °C et les IUC d'environ 0,2, montrant un comportement quasi homogène de la résurgence sur l'ensemble de la péninsule. Seul le profil 4, caractéristique de la partie nord-est, est caractérisé par des occurrences et des extensions mensuelles légèrement supérieures. L'homogénéité de la résurgence est confirmée par la figure 4 représentant la probabilité d'occurrence spatiale (OCC spatiale) de la résurgence. Elle montre une auréole de plus forts pourcentages parallèle à la côte de la Guajira, régulière sur l'ensemble de la péninsule, et dont l'influence diminue graduellement vers le large. Le centre thermique des remontées d'eaux froides, caractérisé par une occurrence spatiale supérieure à 30 %, est limité à l'ouest au niveau de Santa Marta. Côté oriental, il se prolonge jusqu'au bord du golfe du Venezuela, sous l'influence probable de la résurgence de la péninsule du Paraguaná, rapportée par Müller-Karger *et al.* (1989 et 2004) puis Andrade et Barton (2005).

Afin de mieux comprendre la variabilité saisonnière de la résurgence, les variations mensuelles moyennes du pourcentage d'occurrence, ainsi que celles de l'extension et de l'IUC sont mises en parallèle avec l'intensité et la direction mensuelle moyenne des alizés côtiers. Les indices relevés le long du profil 2 sont pris comme représentatifs de la péninsule (figure 5).

Tel qu'énoncé par Farjardo (1978), Corredor (1981), Andrade (2000), Andrade et Barton (2005) et Petus (2006), l'observation de la figure 5 montre une dynamique mensuelle moyenne de la résurgence, reliée à l'intensité des alizés côtiers soufflant sur la péninsule, et donc à la position de la ZITC de part et d'autre de l'équateur. L'influence de la composante du vent, plus ou moins parallèle à la côte, s'ajoute à ce facteur pour expliquer les variations saisonnières de la résurgence.

Durant la saison des vents, de décembre à février, la ZITC est localisée à sa position la plus sud (0-5° S) et l'ensemble du bassin des Caraïbes est dominé par les alizés du nord. Au niveau de la péninsule de la Guajira, l'intensité des vents

est forte et constante, de l'ordre de 9,1 ± 1,0 m s^{-1}. Les alizés de direction ENE-OSO soufflent le plus parallèlement à la côte. En réponse, le signal de la résurgence, faible en décembre, augmente jusqu'en février où l'intensité de la résurgence est maximale (IUC = 0,6 ± 0,1). À cette époque, la résurgence est présente 99 % du temps et son influence atteint en moyenne le centre du bassin, soit plus de 400 km d'extension depuis les côtes colombiennes.

Durant la saison de transition, l'intensité des alizés côtiers diminue progressivement, accompagnée d'un redressement de leur direction de provenance vers l'est. La réponse océanique se réduit en parallèle de mars à mai, où la présence de la résurgence se raréfie (OCC : 23 %). L'extension de la résurgence diminue alors de 300 km en trois mois.

Au cours de la saison de transition, les vents se caractérisent par une intensité moyenne maximale. Au mois de juin, ils possèdent la plus forte variabilité recensée au cours de l'année (VIT = 9,4 ± 2,2 m s^{-1}, DIR = 82 ± 12°). Seules 3 sur les 20 années étudiées (OCC = 18 %) montrent une réponse océanique de faible intensité au stress du vent durant le mois de juillet (IUC = 0,4 ± 0,1).

Enfin, durant la saison des pluies, la principale zone de basse pression de la ZITC migre vers 10-12° N. Les alizés du sud, de faible intensité, peuvent alors franchir l'isthme central américain et entraînent d'intenses perturbations dans le sud-ouest du bassin des Caraïbes (Andrade, 2000). Le fort gradient de vent en découlant entraîne la diminution de l'intensité des alizés du nord soufflant sur le centre du bassin des Caraïbes. De plus, ces vents présentent une forte variabilité. Au niveau de la Guajira, l'intensité des alizés côtiers se réduit ainsi d'août à octobre où la force des vents est minimale, de l'ordre de 6,6 ± 1,9 m s^{-1}. Ces vents sont orientés est-ouest et sont donc dirigés le moins parallèlement aux côtes de la Guajira. Le stress du vent minimal est alors insuffisant pour construire la résurgence.

4.2. Variations interannuelles moyennes de la résurgence

Sur les 20 années de données analysées, la résurgence montre de fréquentes variations interannuelles bien illustrées sur la figure 6 (c et d). Les valeurs de l'IUC fluctuent de 0,1 à 0,9 et sont maximales pour les années 1985, 1986, 1989, 1990, 1991, 1992 et 1994, 1997 et 2000, où leurs valeurs annuelles moyennes dépassent 0,45 (figure 7). Ils évoluent inversement avec les températures de surface relevées (coefficient de corrélation : r = -0,99) qui varient de 25 à 30 °C. L'extension et l'IUC annuel moyen (figure 7) montrent une bonne corrélation (r = 0,6). Quatre années d'expansions maximales se distinguent (1985, 1986, 1989 et 2000) où l'influence des remontées d'eaux froides peut atteindre les côtes d'Haïti, soit à plus de 700 km depuis le littoral de la Guajira. À l'opposé, les années 1995, 1998 et 2003 montrent des extensions inférieures à 200 km, exprimant donc une variabilité annuelle dans l'expansion de la résurgence de plus de 500 km.

Les intensités de vent (figure 6 A et B) s'étendent de 1,50 à 12 m s-1 pour des directions de provenance de 60 à 100°, caractérisant des vents de composante ENE-OSO à E-O. Les vents sont forts en 1992, puis se réduisent progressivement jusqu'en 1998 où leur force est minimale. Leur intensité s'accroît ensuite jusqu' en 2002 avant de diminuer à nouveau. Les directions de provenance des alizés ont une composante nord de 1991 à 1993 puis tendent vers l'est de 1994 à 1998. La période de 1999 à 2005 est caractérisée par des valeurs de directions de provenance plus faibles, minimales en 2000, 2001, et 2004.

L'étude des variations mensuelles moyennes a montré une forte relation entre forçage climatique et réponse de la résurgence. Afin de mieux comprendre les variations interannuelles, les variabilités annuelles moyennes de l'IUC, ainsi que celles de l'extension, de la vitesse et de la direction de provenance des alizés côtiers le long du profil 2 (figure 7) sont mises en relation avec l'indice d'oscillation australe (IOA), téléchargé sur le site du Bureau de météorologie du gouvernement australien (http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml). Cet indice caractérise les situations ENSO (El Nino Southern Oscillation) affectant le Pacifique : un IOA positif indique une situation La Niña tandis qu'un indice négatif caractérise une situation El Niño. Les valeurs utilisées (figure 7) sont définies telles que :

$$IOA = \frac{\left[Pdiff - Pdiff_m\right]}{ET(Pdiff)}$$

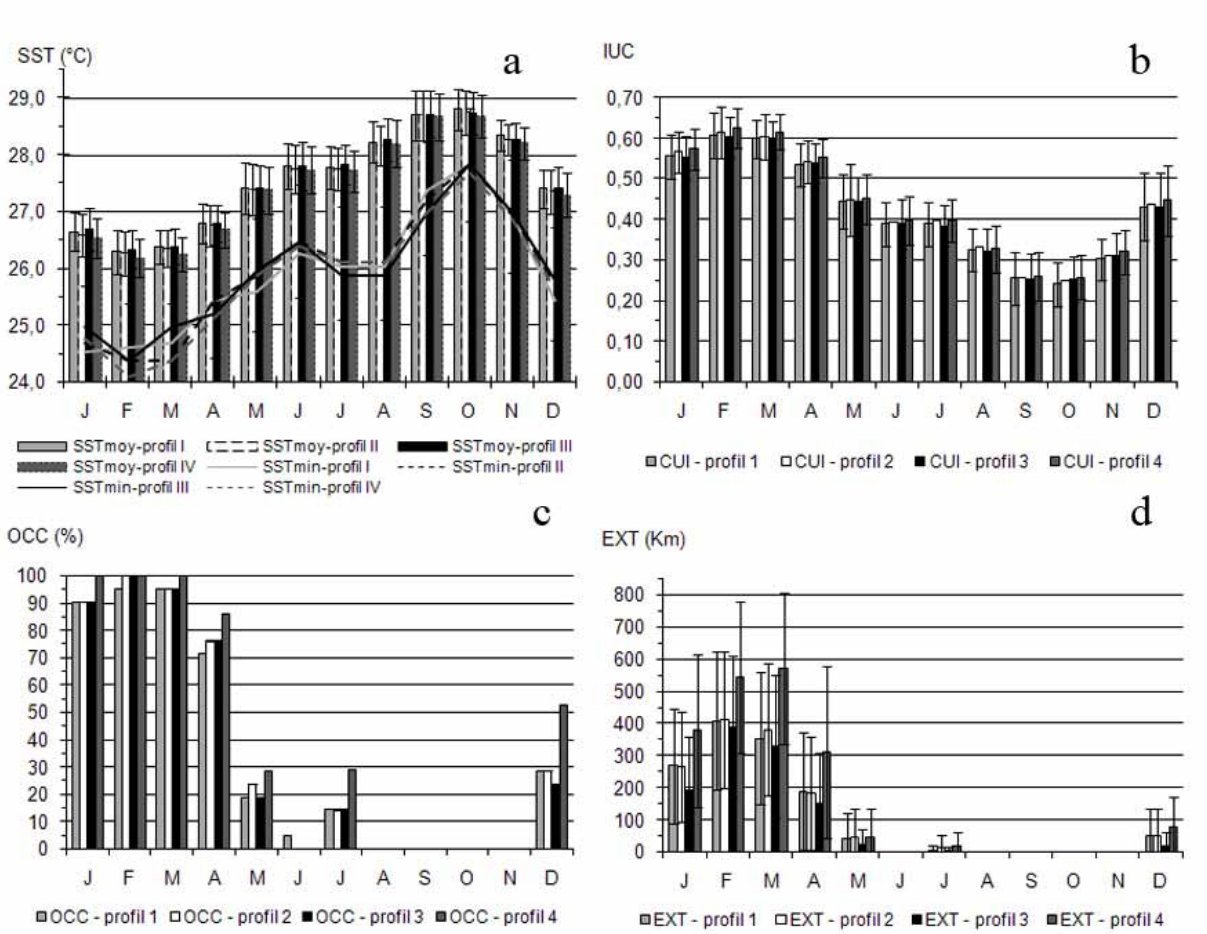
où Pdiff représente la moyenne de la PMNM à Tahiti pour le mois moins la moyenne de la PMNM à Darwin pour le mois, $Pdiff_m$ la moyenne à grande échelle temporelle de Pdiff pour le mois considéré, ET(Pdiff) l'écart type de Pdiff à grande échelle temporelle pour le mois en question et PMNM la pression moyenne du niveau de la mer.

Une classification annuelle des événements ENSO est proposée par le Western Regional Climate Center, basée sur la méthode de Redmond et Koch (1991). Elle s'appuie sur le calcul de la moyenne de l'IOA de juin à novembre, tel que les valeurs de IOA ≤ - 1 indiquent un El Niño fort, IOA ≤ - 0,5 un El Niño modéré, - 0,5 < IOA< 0,5 une année non affectée par ENSO, IOA ≥ 0,5 un La Niña modéré et IOA ≥ 1 un La Niña fort. Ce calcul à été effectué de 1992 à 2005 et les résultats sont indiqués sur la figure 7.

Sur la figure 8, on présente les variations de la vitesse annuelle moyenne du vent et de l'IUC d'une année sur l'autre. La situation ENSO dans le Pacifique au cours de la première année est précisée. Les phénomènes El Niño affectant les années 1992, 1993, 1994, 1997 et 2002 se traduisent systématiquement par une diminution des alizés côtiers (dVIT < 0) l'année suivant leur apparition dans l'océan Pacifique. L'événement El Niño de 1997, le plus fort recensé sur le dernier siècle, est suivi d'une diminution maximale de la force des alizés en 1998. À l'inverse, à la suite des événements La Niña, une augmentation de l'intensité des alizés est observable (dVIT < 0).

Les fluctuations de l'intensité annuelle moyenne de la résurgence semblent montrer une relation avec l'évolution de la force des alizés. À la suite des cinq événements El Niño recensés, quatre années montrent une diminution de l'IUC en réponse à l'affaiblissement des vents. De 1997 à 1998, la diminution de l'indice est maximale. Sur les quatre situations La Niña, seule l'année 2001 ne montre pas d'augmentation de l'IUC (figure 8b). Une relation entre les fluctuations de l'IOA et celles du système de la Guajira semble ainsi exister.

L'étude des variations mensuelles moyennes a mis en évidence une influence probable de la composante parallèle à la côte du vent sur la résurgence. Ceci n'a pas pu être vérifié à l'échelle interannuelle. Il est seulement intéressant de mentionner, à titre de remarque, que l'année 2000 se caractérise par une extension moyenne maximale, corrélable à de fortes vitesses (influence probable de La Niña) combinées à des vents possédant l'orientation moyenne la plus parallèle à la côte de l'ensemble de la base de données.



e

	IUC - SST_{moy}	IUC - OCC	IUC - EXT	IUC - EXT
R^2 profil 2	0,998	0,886	0,802	0,93

Figure 3 : Variations mensuelles moyennes le long des profils I à IV des indices caractérisant la résurgence : a) températures mensuelles minimales (SST_{min}) et moyennes (SST_{moy}) ; b) indice de résurgence côtière (IUC) ; c) pourcentage d'occurrence (OCC) ; d) extension (EXT) ; e) coefficient de corrélation entre les différents indices. *Monthly mean variations along profiles I to IV of the indexes characterizing the upwelling : a) minimal (SSTmin) and average (SSTmoy) ; b) coastal upwelling index (IUC) ; c) occurrence percentage (OCC) ; d) extension (EXT) ; e) coefficient of correlation between thr different indexes.*

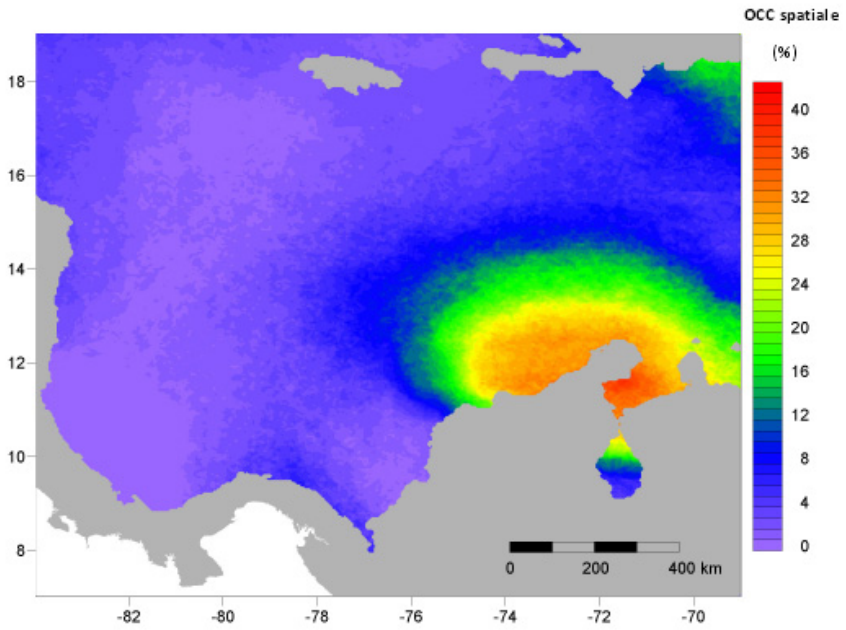


Figure 4 : Carte de la probabilité d'occurrence spatiale des températures moyennes mensuelles de surface inférieures à 26,325° C. *Map of probability of the spatial occurrence of monthly average of surface temperatures lower than 26,325° C.*

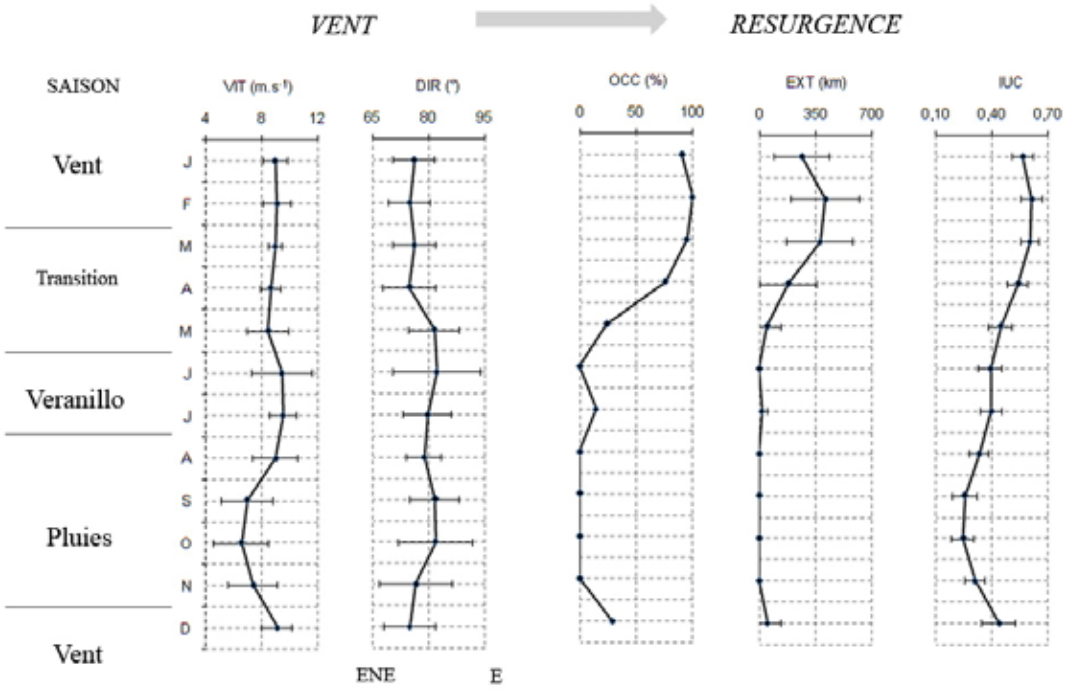


Figure 5 : Variabilité saisonnière moyenne du système de résurgence de la Guajira (profil 2). *Average seasonal variability of the upwelling system of Guajira (section 2).*

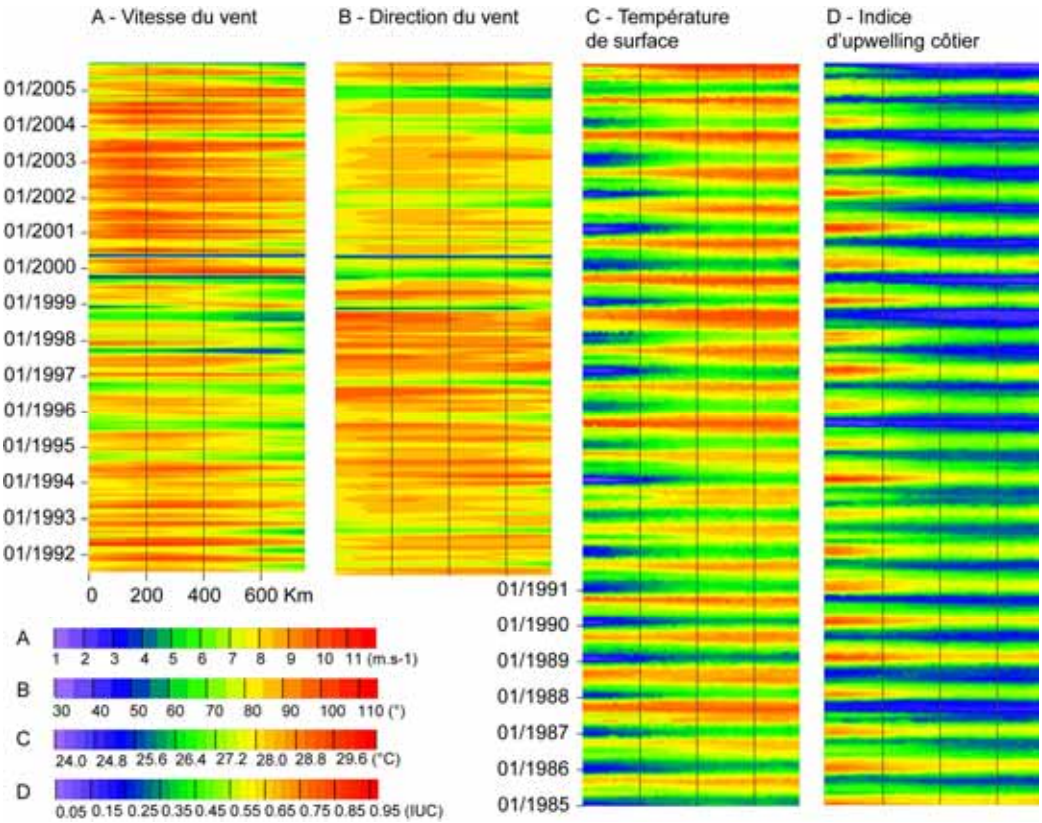


Figure 6 : Profils des variations interannuelles de la vitesse et de la direction du vent (1991-2005 : données AMI-Wind et SeaWinds), de la température moyenne mensuelle nocturne et de l'indice de résurgence côtière (1985-2005 : données AVHRR) le long du profil 2. *Interannual profiles of the wind speed and direction variation (1991-2005: AMI-Wind and SeaWinds data), the average night monthly temperature and the coastal index of upwelling (1985-2005: AVHRR data) along profile 2.*

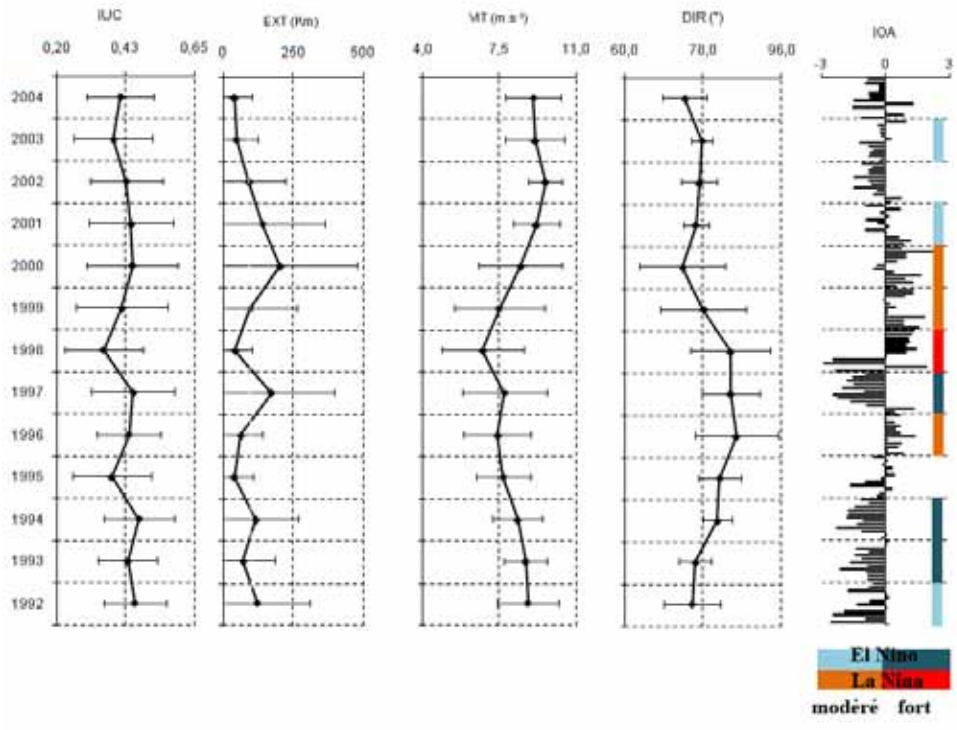
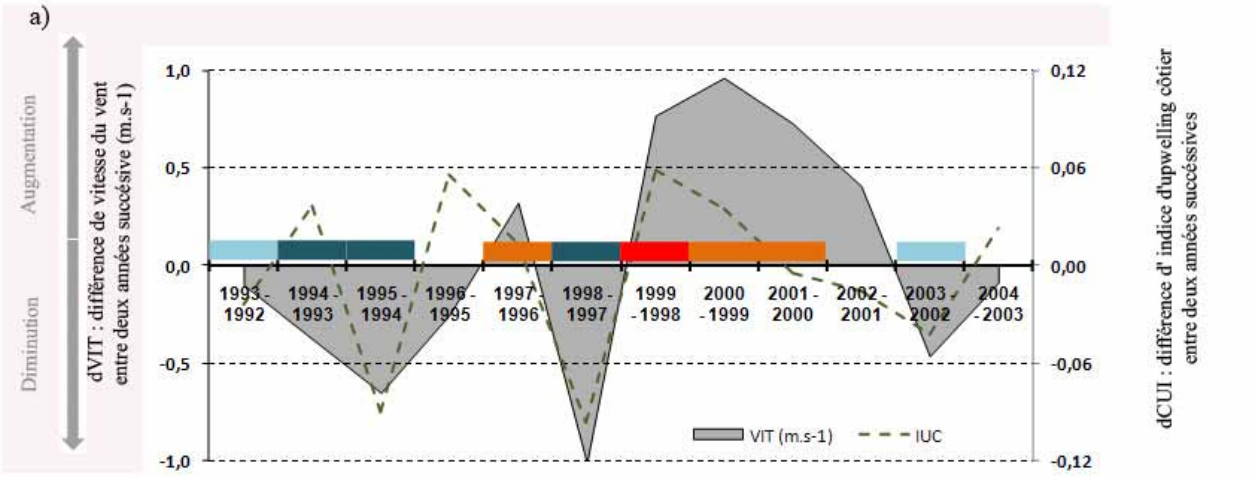


Figure 7 : Variabilité annuelle moyenne du système de résurgence de la Guajira le long du profil 2 et mise en relation avec l'indice d'oscillations australe (IOA). *Average annual variability of the Guajira upwelling system along profile 2 in relation to the southern oscillations index (IOA).*

a)



b)

El Nino		conséquences			La Nina		conséquences		
force	année	année suivante	VIT (m.s-1)	CUI	force	année	année suivante	VIT (m.s-1)	CUI
modérée	1992	1993	baisse	baisse	modérée	1996	1997	augmentation	augmentation
	2002	2003	baisse	baisse		1999	2000	augmentation	augmentation
forte	1993	1994	baisse	augmentation		2000	2001	augmentation	constant
	1994	1995	baisse	baisse	forte	1998	1999	augmentation	augmentation
	1997	1998	baisse	baisse					

Figure 8 : Variations de la vitesse du vent (aires grise) et de l'IUC (pointillé vert) entre deux années successives et mise en relation avec les phénomènes ENSO (rectangles bleu clair : El Niño modéré ; bleu foncé : El Niño fort ; orange : La Niña modérée ; rouge : La Niña fort) : a) courbes des variations ; b) tableau récapitulatif. *Variability of the wind speed (grey area) and of IUC (green dotted line) between two successive year, and their link with the ENSO phenomena (light blue squares = moderate El Nino ; dark blue = strong El Nino ; orange = moderate La Nina ; red = strong la Nina) : a) variation curves ; b) summary table.*

5. DISCUSSION

Ce travail permet de compléter les études précédemment réalisées sur la région (Fajardo, 1978 ; Corredor, 1979, 1981 ; Andrade, 2000 ; Andrade and Barton, 2005). La résurgence de la Guajira apparaît comme un système très réactif. De faibles modifications dans l'intensité et la direction moyenne du vent, respectivement de l'ordre de 3 m s^{-1} et 10°, suffisent à entraîner un balancement de l'extension des eaux froides au sein du bassin de Colombie de plus de 400 km (figure 6).

5.1. Filaments de résurgence

Andrade et Barton (2005), s'appuyant sur 70 images journalières AVHRR, rapportent la présence récurrente de filaments, s'étendant depuis les résurgences de la Guajira et du Paraguaná. Ils précisent que ces figures se développent sur 17 à 25 jours, indépendamment des saisons, et se mélangent dans le centre du bassin sous l'influence du courant des Caraïbes. Ces filaments d'eaux froides, dont l'influence pourrait atteindre plusieurs centaines de kilomètres de distance, seraient responsables de l'exportation des eaux enrichies en nutriments. Les mêmes auteurs proposent deux hypothèses de formation. La première est liée à l'entraînement par les méandres du courant des Caraïbes des eaux profondes récemment remontées en surface. La seconde serait à relier aux instabilités des alizés au niveau des caps, expulsant les eaux hors du plateau continental. La présence de ces filaments n'a pu être détectée sur aucune des 500 images mensuelles étudiées. Deux hypothèses peuvent être avancées : 1) comme les filaments ne sont pas géographiquement statiques, leur localisation est masquée par la mensualisation moyenne des images ; 2) ces figures se développent à une échelle temporaire inférieure, hebdomadaire à journalière, voire exceptionnelle. Une étude d'images satellitaires à haute fréquence temporelle devrait être envisagée afin de mieux comprendre la périodicité et l'influence de ces filaments sur la productivité biologique.

5.2. Comportement saisonnier moyen

À l'échelle saisonnière, l'exploitation de l'imagerie satellitaire a permis de confirmer l'influence du mouvement de la ZITC de part et d'autre de l'Équateur, sur le système de la Guajira (Fajardo, 1978 ; Corredor, 1981 ; Andrade, 2000 ; Andrade and Barton, 2005). Elle a également mis en évidence le rôle de l'orientation du vent par rapport à la côte. Durant la saison des vents, la position sud de la ZITC induit des alizés côtiers puissants et réguliers, soufflant parallèlement à la côte. En réponse au stress atmosphérique et au transport d'Ekman important qui en résultent, l'intensité et

l'extension de la résurgence, faibles en décembre, s'accroissent jusqu'en février où l'influence de la résurgence est maximale. De mars à mai, la réduction de la force des vents et le virement de leur direction de provenance vers l'est entraînent une diminution de la réponse océanique. Contrairement à ce qu'énoncent Andrade (2000), puis Andrade et Barton, (2005), en s'appuyant sur l'étude de 70 images AVHRR, la reprise des vents s'associe rarement à celle de la résurgence lors du « Veranillo ». À cette époque de l'année, la force des alizés est supérieure à celle de la saison des vents, mais leur direction de provenance montre une composante plus est et donc moins parallèle au littoral de la Guajira (figure 5). Le mois de juin est de plus caractérisé par une forte variabilité des vents, pouvant empêcher la construction durable de la résurgence. Ceci, associé à l'aspect temporaire de la reprise, pourrait expliquer le comportement différent de la résurgence en comparaison à la première moitié de l'année. Une étude de la stratification de l'eau à cette époque serait également intéressante afin d'identifier un éventuel effet océanographique limitant la formation de la résurgence. Enfin, durant la saison des pluies, la migration de la ZITC vers le nord entraîne la diminution de l'intensité des alizés. Ces vents orientés le moins parallèlement aux côtes de la Guajira sont insuffisants pour initier la formation de la résurgence.

5.3. Comportement interannuel moyen : influence des événements ENSO

À l'échelle interannuelle, les fluctuations observées d'une année à l'autre peuvent être mises en relation avec les événements ENSO affectant le Pacifique. Les phénomènes El Niño se traduisent systématiquement par une diminution des alizés côtiers, l'année suivant leur apparition dans le bassin du Pacifique. Le stress atmosphérique diminuant, la résurgence montre une réduction quasi systématique de son intensité. En 1998, à la suite du plus fort événement El Niño recensé dans le dernier siècle, l'intensité et l'extension de la résurgence se réduisent au maximum, et la résurgence disparaît presque des côtes colombiennes en février (figure 9).

Un changement dans les conditions météorologiques du bassin des Caraïbes semblant coïncider avec les événements ENSO a déjà été observé. Enfield et Mayer (1997) indiquent que 50 à 80 % des anomalies de SST dans ce bassin sont associées à ces événements et précisent que le réchauffement des SST dans l'Atlantique a lieu 4 à 5 mois après celui du Pacifique. Alexander et Scott, (2002) confirment ce constat et indiquent un retard de 2 à 5 mois. Les mécanismes amenant aux interconnections Pacifique-Caraïbes ainsi que l'influence des anomalies de températures sur le comportement atmosphérique demeurent cependant encore mal comprises. Alexander et Scott (2002) proposent une influence des anomalies thermiques sur l'humidité et donc sur la convection au-dessus des masses terrestres. Ce phénomène pourrait entraîner la diminution de la cellule de Walker s'étendant le long de la mer des Caraïbes, amenant au affaiblissement des alizés sur l'ensemble du bassin et, par conséquent, à la réduction de l'intensité des résurgences. À l'inverse, les années suivant les événements La Niña semblent montrer une reprise de l'intensité des alizés côtiers et de la résurgence.

Andrade (2000) évoquait le rôle probable des phénomènes El Niño sur la résurgence de la Guajira. Cette étude semble confirmer l'influence d'ENSO. Il serait très intéressant de poursuivre les investigations sur le long terme afin de mieux appréhender les connexions océaniques et de prévoir de manière plus rigoureuse la dynamique annuelle de la résurgence.

6. CONCLUSION

Cette étude a été entreprise dans le cadre d'un projet visant à améliorer la connaissance de la zone côtière de la Guajira pour une meilleure gestion de ses ressources océaniques. L'utilisation des images satellitaires, dans une zone où les données acquises *in situ* restent peu nombreuses et parfois peu fiables, procure un outil efficace pour la caractérisation de l'influence de la résurgence au sein du bassin des Caraïbes. Les banques de données actuellement disponibles permettent une étude à grande échelle temporelle et ainsi une meilleure compréhension des phénomènes atmosphériques responsables de sa périodicité et de sa variabilité.

La résurgence de la Guajira est un phénomène saisonnier, récurrent annuellement. Elle affecte le bassin de janvier à avril sous l'influence des alizés forts et réguliers qui s'étendent jusqu'à la péninsule de la Guajira. Son centre thermique est limité à l'ouest, au niveau de la ville de Santa Marta. Du côté oriental, son influence se prolonge jusqu'au golfe du Venezuela, sous l'influence probable de la résurgence de la péninsule du Paraguaná. À l'échelle saisonnière, la variabilité de la résurgence est liée au mouvement méridional de la ZITC de part et d'autre de l'Équateur (contrôlant l'intensité des vents côtiers) combiné à l'influence de la composante du vent plus ou moins parallèle à la côte. La résurgence est maximale en février alors que son extension atteint en moyenne le centre du bassin. La reprise des vents au « Veranillo » ne s'accompagne pas de celle, significative, de la résurgence. À l'échelle interannuelle, cette étude met en évidence une relation entre la variabilité de l'intensité de la résurgence et les phénomènes ENSO affectant le Pacifique.

La résurgence de la Guajira est une petite résurgence, sa présence étant limitée à quelque mois dans l'année. De plus, son influence en termes de variations thermiques demeure faible en comparaison, par exemple, avec la résurgence du Sénégal, située approximativement à la même latitude (Demarcq et Faure, 2000). Les eaux subtropicales nord-atlantiques résurgentes sont caractérisées par une faible teneur en nutriment (Corredor, 1979). Cependant, au sein du bassin des Caraïbes, pauvre en nutriment, cet apport, même minime, peut jouer un rôle majeur sur la productivité biologique et donc sur la capacité de pêche, facteur économique majeur dans cette région de la Colombie.

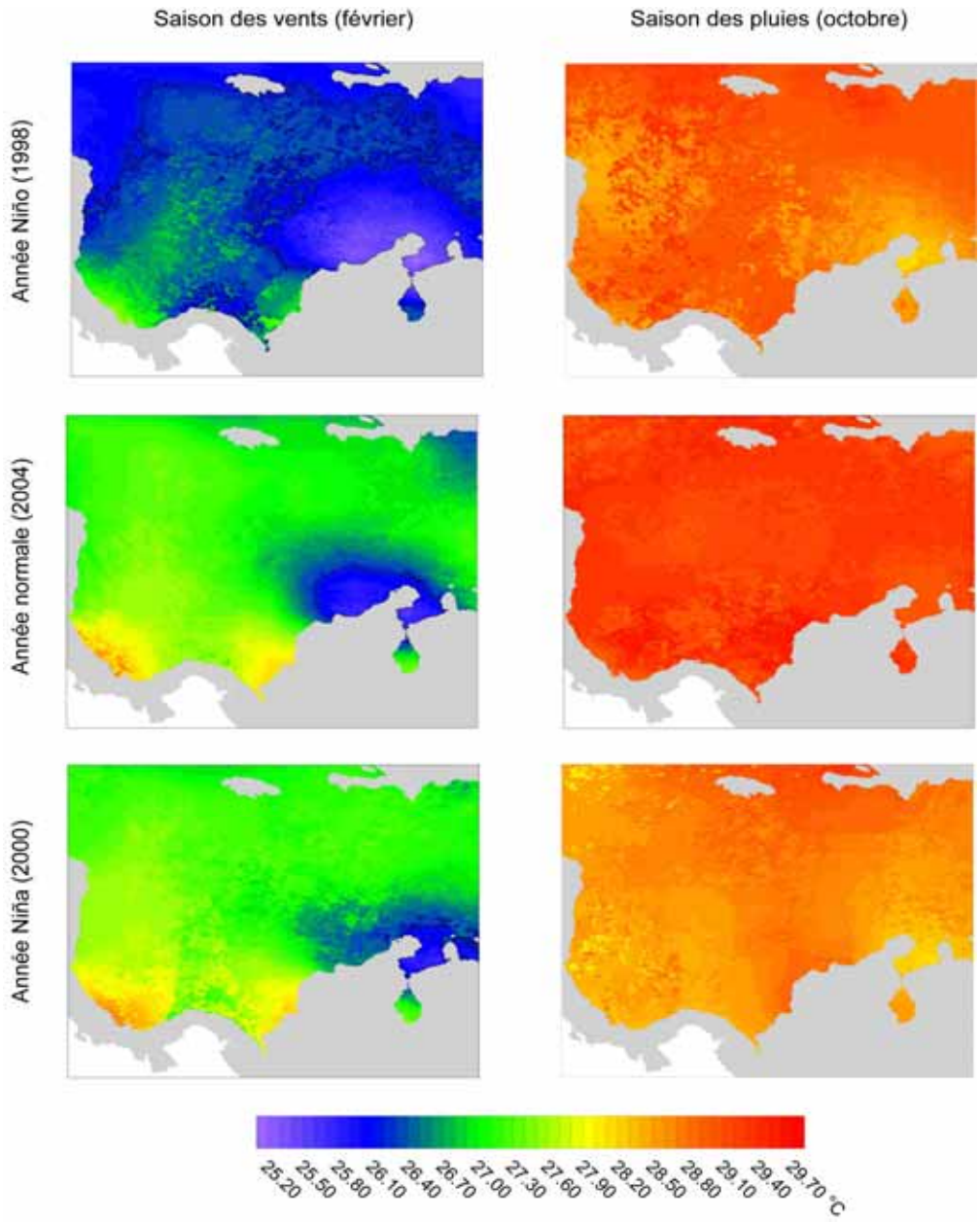


Figure 9 : Sélection d'images de température moyenne mensuelle nocturne en période de résurgence (février) et de non-résurgence (octobre), lors d'un événement El Niño (1998), d'une situation normale (2004) et d'un épisode La Niña (2000) ; l'isotherme 26,325 °C est souligné par un trait de couleur noire. *Images of average monthly night temperature during upwelling period (February) and non-upwelling period (October), during an El Niño event (1998), normal situation (2004) and La Niña episode (2000);* the 26,325 °C isotherm is underlined in black.

7. Remerciements

Cet article est dédié à la mémoire de Ferdinand Bonn, dont la soudaine disparition nous a laissés dans une immense tristesse.

Les auteurs sont reconnaissants aux instituts INVEMAR à Santa Marta (Colombie) et CNRS à Meudon (France) d'avoir accueilli l'un d'entre eux (C. Petus) et permis de mener à bien cette étude. Ils sont également redevables à la corporation régionale CorpoGuajira d'avoir pris en charge les missions qu'ils ont eu à effectuer.

L'étude n'aurait pu être réalisée sans la mise à disposition des archives MWF des diffusiomètres AMI-Wind et SeaWinds par le CERSAT (Centre ERS d'archivage et de traitement), ainsi que les archives *The 4 km AVHRR Pathfinder Version 5.0 SST* par le National Oceanographic Data Center.

Références

Alexander, M. and Scott, J. (2002) The influence of ENSO on air-sea interaction in the Atlantic. Geophysical Research Letters, vol. 29, p. 46-1 - 46-4.

Andrade, C. (2000) Circulation and Variability of the Colombian Basin in Caribbean Sea. Thèse de doctorat, University of Wales (Royaume-Uni), 223 p.

Andrade, C.A., Barton, E.D. and Mooers, C.N.K. (2003) Evidence for an Eastward Flow along the Central and South American Caribbean Coast. Journal of Geophysical Research, vol. 108, C6-3185.

Andrade, C. and Barton, E.D. (2005) The Guajira Upwelling System. Continental Shelf Research, vol. 25, p. 1003-1022.

CERSAT (Centre ERS d'archivage et de traitement) (2007) Bases de données d'altimétrie des champs de vent moyens. http://www.ifremer.fr/cersat/en/index.htm

CIOH (Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas) (2000) Atlas Cartografico de los Oceanos y Costas de Colombia. Cartagena de Indias, Publicación 3007, Edición 1ra del 2000.

Corredor, J. (1979) Phytoplankton response to low level nutrient enrichment thought upwelling in the Colombian Caribbean Sea. Deep Sea Research, vol. 26a, p. 731-741.

Corredor, J. (1981) Apuntes Sobre la Circulación Costera en el Caribe Noroccidental Colombiano. Boletin Cientifico CIOH, vol., 3, p. 3-8.

Demarcq, H. and Faure, V. (2000) Coastal Upwelling and Associated Retention Indices Derived from Satellite SST – Application to Octopus. Oceanologica Acta, vol. 23, p. 391-408.

Enfield, B.D. and Mayer, A.D. (1997) Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño Southern Oscillation. Journal of Geophysical Research, vol. 102, p. 929-945.

Farjardo, G. (1978) Surgencia Costera en las proximidades de la Península de la Guajira, Boletin Cientifico CIOH, vol. 2, p. 7-19.

Müller-Karger, F., McClain, C.R., Fisher, T.R., Esaias, W.E. and Varela, R. (1989) Pigment distribution in the Caribbean sea: Observations from space. Progress In Oceanography, vol. 23, p. 23-64.

Müller-Karger, F., Varela, R., Thunell, R., Astorb, Y., Haiying, Z., Luerssena, R. and Hua, C. (2004) Processes of coastal upwelling and carbon flux in the Cariaco Basin. Deep-Sea Research, vol. 51, p. 927-943.

NODC (National Oceanographic Data Center) (2006) 4 km Pathfinder Version 5.0 User Guide. http://www.nodc.noaa.gov /sog/pathfinder4km.

NORAD/UNDP/FAO (1988) Surveys of the Fish Resources in the Shelf Areas between Suriname and Colombia - Final Report. NORAD/UNDP/FAO Programme, Institute of Marine Research, Bergen, multipagination.

Petus, C. (2006) Application de l'imagerie satellitaire à l'étude du comportement de l'upwelling de la Guajira (Colombie). Rapport de Master II, Université de Bordeaux I, Bordeaux, 30 p.

Pujos, M., Pagliardini, J., Steer, R., Vernette, G. y Weber, O. (1986) Influencia de la contra corriente norte colombiana para la circulation de las aguas en la plateforma colombiana : su accion sobre la dispersion de los effluentes en suspension del rio Magdalena. Boletin Cientifico CIOH, vol. 6, p. 3-15.

Redmond K.T. and Koch R.W. (1991) Surface climate and streamflow variability in the western United States and their relationship to large-scale circulation indices. Water Resources Research, vol. 27, n° 9, p. 2381-2399.

Vazquez, J., Perry, K. and Kilpatrick, K. (1998) NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Set User's Reference Manual Version 4.0. JPL Publication D-14070, Jet Propulsion Laboratory, Passadena, multipagination.