

# **Un Demi Siècle D'évaluation De L'activité De L'upwelling De La Côte Atlantique Marocaine**

***Karim Hilmi, PhD***

***Ismail Bessa, MSc***

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

***Anass El Aouni, PhD***

Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique  
Grenoble, France

***Ahmed Makaoui, PhD***

***Omar Ettahiri, PhD***

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

Doi:10.19044/esj.2020.v16n21p89

[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n21p89](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n21p89)

---

## **Résumé**

Les écosystèmes d'upwelling situés en bordures Est (EBUEs) sont parmi les écosystèmes les plus productifs au monde et leur réponse au changement climatique d'une importance cruciale. La variabilité saisonnière et décennale à long terme de l'activité d'upwelling de la partie nord du grand écosystème marin du Courant des Canaries (CCLME) a été étudiée dans ce travail sur une période de 53 ans (1967-2019) à deux stations situées respectivement au nord (31°N-10,5°O) et au sud (24,5°N-15,5°O) de la côte atlantique marocaine, en élaborant l'Indice d'Upwelling de Bakun (UI) mensuel. Les résultats obtenus montrent que l'upwelling présente une variabilité saisonnière entre Cap Juby - Larache et une activité quasi permanente toute l'année entre Cap Juby - Cap Blanc. En relation avec la variabilité décennale et dans la zone nord atlantique marocaine, les plus fortes activités de l'upwelling ont été observées en saisons d'été, en particulier sur la période 1998-2003 et son activité a légèrement dépassé la moyenne sur les périodes 1972-1977, 1980-1984, 2004-2008. Les plus faibles activités de l'upwelling dans cette zone ont été observés en saisons d'automne/hiver, notamment sur les périodes 1967-1970, 1995-1998 et 2000-2005. S'agissant de la zone sud atlantique marocaine, l'activité de l'upwelling a présenté une forte activité de l'upwelling en été sur les périodes 1967-1980 et 2009-2019, avec des fluctuations annuelles à interannuelles variables entre ces deux périodes. Cette activité a été légèrement supérieure à la moyenne en été sur la période 1981-2007, sauf pour les années 1982-1983, 1988-1989, 1995-1997 et 2004-2007 où il a été observé une relative tendance vers la baisse. De plus

faibles activités de l'upwelling ont été observées dans cette zone sur la période 2003-2010 en saisons d'automne/hiver.

---

**Mots Clés:** Ecosystème Du Large Du Courant Des Canaries, Maroc, Remontée D'eau Profonde, Indice D'upwelling De Bakun, Variabilités Saisonnière Et Décennale

---

## **A Half of Century of Upwelling Activity's Evaluation for the Moroccan Atlantic Coast**

*Karim Hilmi, PhD*

*Ismail Bessa, MSc*

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

*Anass El Aouni, PhD*

Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique  
Grenoble, France

*Ahmed Makaoui, PhD*

*Omar Ettahiri, PhD*

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

---

### **Abstract**

Eastern Boundary Upwelling Ecosystems (EBUEs) are among the most productive ecosystems in the world, meaning that their response to climate change is of critical importance. In this work, we investigate the long-term seasonal and decadal variability of the upwelling activity along the northern part of the Canary Current Large Marine Ecosystem (CCLME) over a period of 53 years (1967-2019). Two stations were selected in this study representative of the upwelling activity in the moroccan atlantic coast, one in the north ( $31^{\circ}$  N- $10.5^{\circ}$ W) and the other in the south ( $24.5^{\circ}$  N- $15.5^{\circ}$ W) using the monthly Bakun Upwelling Index (UI). The results shows a seasonal variability in the northern region of morocco between Cap Juby - Larache and almost permanent activity all year round in the southern region of morocco between Cap Juby - Cap Blanc. These results are consistent with previous studies based on the seasonality of the upwelling regime in this region. Related to the decadal variability, the strongest activities of upwelling were observed during summer seasons in the northern region, in particular over the period

1998-2003 and its activity slightly exceeded the average over the periods 1972-1977, 1980-1984, 2004-2008. The weakest upwelling activities in this region were observed in the fall-winter seasons, particularly during the periods 1967-1970, 1995-1998 and 2000-2005. In the southern region, the upwelling activity showed strong upwelling activity in summer over the periods 1967-1980 and 2009-2019, with annual and interannual between these two periods. This activity was slightly above average in summer over the 1981-2007 period, except for the years 1982-1983, 1988-1989, 1995-1997 and 2004-2007 where a relative downward trend was observed. Lower upwelling activities were observed in this area over the 2003-2010 period in fall / winter seasons.

---

**Keywords:** Canary Current Large Marine Ecosystem, Morocco, Upwelling, Bakun Upwelling Index, Seasonal And Decadal Variability

## Introduction

Les écosystèmes d'upwelling (terme anglophone relatif aux remontées des eaux profondes) situés en bordures Est (ou EBUEs "Eastern Boundary Upwelling Ecosystems") sont parmi les écosystèmes les plus productifs au monde. Ils couvrent une petite zone océanique (<1%) mais contribuent à 20% des prises mondiales de poissons (Pauly et Christensen, 1995) et sont des zones à forts impacts écologique et socio-économique. L'upwelling côtier est une remontée des eaux profondes sur le plateau continental qui compense la dérive des eaux de surface vers le large (dérive d'Ekman), sous les actions combinées d'un vent favorable et de la rotation de la Terre. Il caractérise une large part des bordures Est des océans aux latitudes tropicales et subtropicales où la régularité des vents alizés confère au phénomène d'upwelling une variabilité dans l'espace et dans le temps et un caractère permanent ou saisonnier (Wooster, 1976). Les eaux froides remontant le long de la côte atlantique marocaine sont généralement riches en nutriments (Makaoui *et al.*, 2005, Orbi *et al.*, 1998...) et qui sont essentiels au maintien de la production biologique (Berraho *et al.*, 2005; El Aouni *et al.*, 2019a et 2020b; El Ghrib *et al.*, 2012; Ikram *et al.*, 2017, La côte atlantique marocaine (figure 1), faisant partie du système d'upwelling du Courant des Canaries et faisant l'objet de cette étude, est soumise dans sa zone nord à un upwelling saisonnier très actif en été entre Cap Juby et Larache et quasi permanent dans sa zone sud, très actif au printemps/été et automne entre Cap Blanc et Cap Juby (Atillah *et al.*, 2005; Bessa *et al.*, 2017, 2020; Benazzouz *et al.*, 2014; El Aouni *et al.*, 2019 a et b; 2020 a et b; Larissi *et al.*, 2013 ; Makaoui *et al.*, 2005, 2012; Tamim *et al.*, 2019; Orbi *et al.*, 1998,...). En relation avec la problématique du changement climatique dans les EBUEs dont la zone du courant des Canaries, plusieurs autres études ont été menées en citant, par exemple, les travaux de Bakun (1990); Bakun *et al.* (1995, 2015); Cropper *et al.* (2014); McGregor *et*

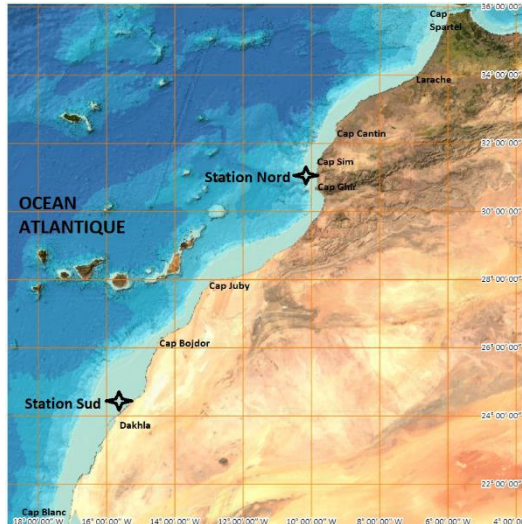
*al.* (2007); Narayan *et al.* (2010); Wang *et al.* (2015),.... Compte tenu de l'importance de l'activité de l'upwelling sur la richesse et la productivité du milieu marin, ce travail vient compléter les études antérieures dans la région dont la plupart d'entre elles reposent sur l'élaboration d'un indice d'upwelling côtier, à partir de la température de la surface de la mer (ou «SST») issue des observations satellitaires. L'objectif de ce travail original est d'évaluer sur le long terme l'activité de l'upwelling de la côte atlantique marocaine sur la période 1967-2019 (53 ans), basée sur l'élaboration d'un indice d'upwelling (UI) mensuel, communément appelé «Indice d'Upwelling de Bakun» (Bakun, 1973, 1975; Schwing *et al.*, 1996) à deux stations situées sur la côte atlantique marocaine qui seront présentées à la section suivante. Les variabilités saisonnière, décennale à inter décennale de l'activité de l'upwelling sur cette côte seront aussi analysées et discutées sur cette période d'étude.

### Matériel et méthodes

Compte tenu de l'importance de l'upwelling côtier en tant que moteur de la dynamique dans les EBUS, l'utilité de quantifier sa variabilité dans l'espace et le temps a été reconnue durant plusieurs décennies. Cependant, la variabilité spatio-temporelle des intensités verticales océaniques et leur faible signal par rapport aux vitesses horizontales ne permettent pas une surveillance directe de l'upwelling. Pour répondre aux besoins d'estimations historiques et continues de l'intensité de l'upwelling côtier, Bakun (1973, 1975; Schwing *et al.*, 1996) ont développé l'indice de l'upwelling côtier en se basant sur la théorie d'Ekman (Ekman, 1905) pour des estimations du transport Ekman comme indicateur de l'upwelling côtier. Cet indice de l'upwelling côtier est estimé à partir des équations suivantes, en supposant une homogénéité sur la colonne d'eau, un vent uniforme et des conditions de régime permanent (Bakun, 1973, 1975, Schwing *et al.*, 1996):

$$\vec{M} = \frac{1}{f} \vec{\tau} \times \vec{k} \quad (1)$$

$$\vec{\tau} = \rho_a C_d |\vec{v}| \vec{v} \quad (2)$$



**Figure 1:** Localisation des deux stations d'étude Nord et Sud (en symbole  $\blacklozenge$ ) le long de la côte atlantique marocaine (adapté de GEBCO MAP 2014).

Où:

- $\vec{M}$  est le transport d'Ekman, vecteur décomposable en deux composantes zonale et méridionale du transport;
- l'Indice d'Upwelling de Bakun (UI) (en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$  côte linéaire) est établi selon l'équation (1); il présente des valeurs positives (respectivement négatives) pour des conditions favorables (défavorables) de l'upwelling;
- $\vec{k}$  est un vecteur unitaire;
- $\vec{\tau}$  est le stress du vent (en  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ );
- $\rho_a$  est la densité de l'air (en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );
- $C_d$  est le coefficient de traînée (ou « drag » coefficient) (0.0026 sans unité);
- $\vec{v}$  est le vecteur du vent géostrophique en surface dérivé des champs de pression atmosphérique de surface;
- $|\vec{v}|$  est l'intensité du vent géostrophique en surface (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

En se basant sur cette méthodologie et de manière à répondre aux objectifs de cette étude, le choix des stations d'étude a été porté à deux stations, situées respectivement dans la zone nord (station Nord  $31^\circ\text{N}$ - $10,5^\circ\text{O}$  située entre Cap Sim et Cap Ghir) et dans la zone sud (station Sud  $24,5^\circ\text{N}$ - $15,5^\circ\text{O}$  au nord de Dakhla) de la côte atlantique marocaine (figure 1). Le choix de ces deux stations a été dicté par le fait qu'elles sont représentatives de la dynamique et de la saisonnalité de l'upwelling côtier le long de la côte atlantique marocaine: saisonnier dans la zone Nord (entre Cap Juby et Larache) et quasi permanent dans la zone Sud (entre Cap Blanc et Cap Juby). Les données mensuelles, utilisées dans cette étude, sont en provenance de la

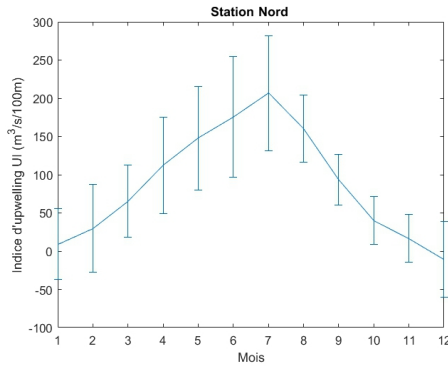
NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration - Fisheries) ([www.pfeg.noaa.gov](http://www.pfeg.noaa.gov)) et portent sur la période 1967-2019.

## Résultats et discussion

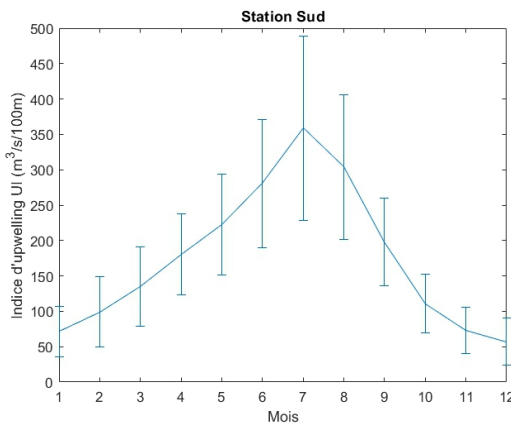
### a- Variabilité saisonnière de l'upwelling

La figure 2a présente l'indice d'upwelling de Bakun mensuel à la station Nord, moyenné sur la période 1967-2019. D'après cette figure, cet indice présente des valeurs négatives qui sont représentatives d'un "downwelling" ou absence de l'activité de l'upwelling le mois de décembre ( $-10.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$ ). L'activité de l'upwelling est relativement «faible» en hiver et démarre progressivement au printemps pour atteindre une activité maximale en saison d'été. Elle commence à diminuer progressivement en saison d'automne. Pour cette station Nord, le pic maximal de l'activité de l'upwelling a été observé au mois de juillet (pic maximal de  $207 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$ ) (figure 2a). La figure 2b présente l'indice d'upwelling de Bakun mensuel à la station Sud, moyenné sur la période 1967-2019. Contrairement à la figure 2a, cet indice mensuel présente des valeurs positives observées sur toute l'année, ce qui dénote d'une activité quasi permanente de l'upwelling durant toute l'année (figure 2b). Cette activité démarre progressivement en hiver (entre  $57$  et  $135 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$ ), atteint son pic maximal en été au mois de juillet ( $359 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$ ) puis diminue progressivement en automne (entre  $70$  et  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100\text{m}^{-1}$ ) (figure 2b). Les résultats ainsi obtenus à ces deux stations Nord et Sud de la côte atlantique marocaine sont en concordance avec les études déjà réalisées sur cette côte (Atillah *et al.*, 2005; Bessa *et al.*, 2017, 2020; Benazzouz *et al.*, 2014; El Aouni *et al.*, 2020 a et b; Makaoui *et al.*, 2005, 2012; Tamim *et al.*, 2019; Orbi *et al.*, 1998,...), à savoir que l'activité d'upwelling est saisonnière avec un maximum d'intensité en été dans la zone nord atlantique marocaine et quasi permanente durant toute l'année avec un maximum d'intensité en été dans la zone sud atlantique marocaine.

a)



b)



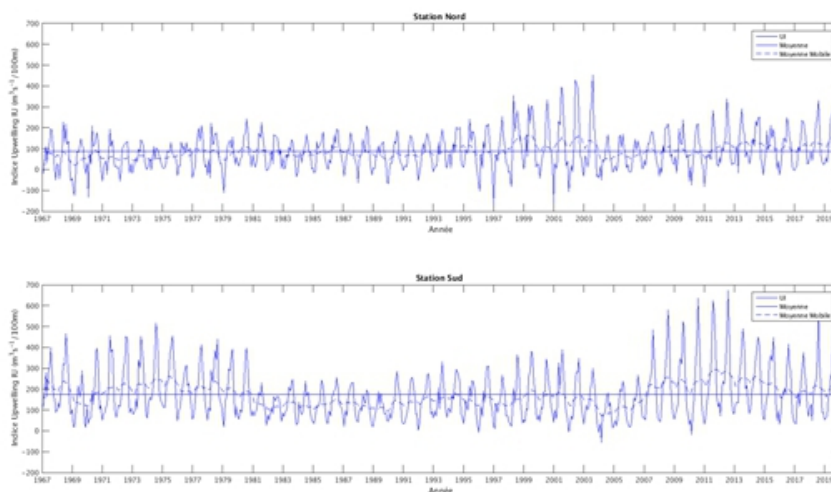
**Figure 2:** Variabilité saisonnière de l'Indice d'Upwelling de Bakun (avec écart type) sur la période 1967-2019 pour les stations a) Nord (31°N-10,5°O) et b) Sud (24,5°N-15,5°O) de la côte atlantique marocaine.

### b- Variabilité décennale de l'upwelling

La figure 3 présente l'évolution décennale de l'indice d'upwelling de Bakun sur la période 1967-2019 (53 ans) aux deux stations d'étude Nord et Sud. La moyenne de cet indice, calculée sur cette période d'étude, y est représentée à chaque station. L'indice d'upwelling moyen de Bakun, calculé sur cette période d'étude, est de  $87.2 (\pm 88.2) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$  pour la station Nord et de  $174.2 (\pm 118.6) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ , ce qui permet de fournir une indication complémentaire sur les années où l'activité de l'upwelling présenterait une activité "supérieure" à la moyenne ou "en deçà" de la moyenne (figure 3). Aux stations Nord et Sud, la figure 3 montre, d'une part, une activité de l'upwelling en «dents de scie» qui est maximale (« pics ») en été comme mentionné précédemment et présentée à la figure 2. A ces deux stations, cette activité est aussi variable selon les années et selon les décennies, d'autre part. Sur la base de ces résultats, la station Sud présenterait une forte activité d'upwelling en été (indice maximal variant entre 200 et  $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ ) sur les périodes 1967-1980 et 2009-2019, avec des fluctuations

annuelles variables entre ces deux périodes comme, par exemple, pour les années 1969, 1976 pour la première période et entre 2013 et 2017 pour la seconde période (figure 3). Sur la période 1981-2007, on note que l'activité de l'upwelling a présenté une activité en été légèrement supérieure à la «moyenne», sauf pour les années 1982-1983, 1988-1989, 1995-1997 et 2004-2007 où l'on a observé une relative «tendance» vers la baisse. A cette station, les plus forts «minimas» sont observés sur la période 2003-2010 en saisons automne/hiver (figure3). S'agissant de la station Nord, les plus fortes activités de l'upwelling sont observées en saisons d'été comme présenté à la figure 2. Ils dépassent légèrement la moyenne sur les périodes 1972-1977, 1980-1984, 2004-2008 et une très forte activité a été observée en été entre 1998-2003 (figure 3). Les plus forts «minimas» ont été observés en saisons d'automne/hiver, relatant d'une faible activité en ces saisons sur les périodes 1967-1970 et 1995-1998 et 2000-2005. Des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre ces fluctuations durant ces périodes/années particulières, aussi bien aux stations Nord que Sud. Comme signalé par plusieurs études menées sur la côte atlantique marocaine, les différentes tendances ainsi observées à ces deux stations sont liées aux conditions atmosphériques et océanographiques de chaque zone (Bessa *et al.*, 2017, 2020; Benazzouz *et al.*, 2013; 2014 et 2015; Makaoui *et al.*, 2005 et 2012; Orbi *et al.*, 1998,...).

**Figure 3:** Evolution de l'indice d'upwelling de Bakun (UI) sur la période 1967-2019 à la station Nord (31°N-10,5O) (figure du haut) et à la station Sud (24,5°N-15,5°O) (figure du bas). La moyenne de l'indice d'upwelling (UI), calculée sur cette période, y est représentée en trait plein à chaque station; la moyenne mobile de l'indice, calculée sur 12 mois, y est représentée en trait pointillé à chaque station.



En effet, la zone Nord atlantique du Maroc est soumise à des caractéristiques climatiques et océanographiques qui sont différentes de la



zone Sud Atlantique du Maroc. En dépit de la disponibilité des données qui sont issues de plusieurs plateformes nationales et/ou internationales, plusieurs études mettent aussi l'accent sur la résolution des données ainsi que sur les périodes d'observation des données (Barton *et al.*, 2013). Dans un contexte de changement climatique où la tendance de l'activité de l'upwelling dans les zones d'upwelling (EBUEs) est soit vers la "hausse" ou vers la "baisse" (Bakun *et al.*, 1990, 2015; Barton *et al.*, 2013), la recherche scientifique actuelle est orientée vers les projections des modèles climatiques du GIEC (RCP 2.0 à RCP 8.5). Elle fait actuellement l'objet d'un large débat parmi la communauté scientifique et de travaux de recherche avancés comme l'attestent les travaux de Cropper *et al.*, (2014), McGregor *et al.*, (2014), Narayan *et al.*, (2010), Wang *et al.* (2015),... et bien d'autres travaux sur les zones d'upwelling du Courant des Canaries et/ou des EBUEs à travers le monde.

## Conclusion

Constituant un travail original sur l'upwelling de la côte atlantique marocaine et en vue de compléter les travaux antérieurs établis dans la zone du Courant des Canaries, l'activité de l'upwelling à long terme a été appréhendée et discutée sur la période 1967-2019 (53 ans), à partir de l'indice d'upwelling de Bakun (UI) élaboré à deux stations, situées respectivement dans les zones nord ( $31^{\circ}\text{N}-10,5^{\circ}\text{O}$ ) et sud ( $24,5^{\circ}\text{N}-15,5^{\circ}\text{O}$ ) de cette côte. En terme de variabilité saisonnière, les résultats obtenus dénotent que l'activité de l'upwelling est saisonnière avec un maximum d'intensité en été dans la zone nord et quasi permanente durant toute l'année avec un maximum d'intensité en été dans la zone sud, ce qui est en concordance avec les études antérieures menées sur cette côte. S'agissant de la variabilité décennale à inter décennale sur la période d'étude et sur la base de ces résultats, la zone sud atlantique marocaine présenterait une forte activité de l'upwelling en été sur les périodes 1967-1980 et 2009-2019, avec des fluctuations annuelles à interannuelles variables entre ces deux périodes. Sur la période 1981-2007, l'activité de l'upwelling a présenté une activité en été légèrement supérieure à la «moyenne», sauf pour les années 1982-1983, 1988-1989, 1995-1997 et 2004-2007 où il a été observé une relative «tendance» vers la baisse. De plus faibles activités de l'upwelling ont été observées sur la période 2003-2010 en saisons d'automne/hiver. S'agissant de la zone nord atlantique marocaine, les plus fortes activités de l'upwelling ont été également observées en saisons d'été. Son activité a dépassé légèrement la moyenne sur les périodes 1972-1977, 1980-1984, 2004-2008 et une très forte activité a été observée en été sur la période 1998-2003. Les faibles activités de l'upwelling dans cette zone ont été elles aussi observés en saisons d'automne/hiver, notamment sur les périodes 1967-1970; 1995-1998 et 2000-2005. Compte tenu de la forte

variabilité de l'upwelling dans l'espace et dans le temps à forts impacts sur la productivité du milieu marin et sur les pêcheries, un suivi de l'activité de l'upwelling par différentes plateformes est requis et des investigations plus avancées seraient aussi nécessaires pour mieux comprendre les périodes faibles/fortes activités de l'upwelling et les interactions entre le climat et le milieu marin.

### Remerciements

Nos vifs remerciements vont à L. deWit et à M.G. Jacox pour leur précieux appui, à H. Moustahfid pour ses pertinentes remarques à ce travail, au GEBCO WORLD MAP 2014 ainsi qu'aux deux évaluateurs anonymes de la revue.

### References:

1. Atillah, A., Orbi, A., Hilmi, K. & Mangin, A. (2005). Produits opérationnels d'océanographie spatiale pour le suivi et l'analyse du phénomène d'upwelling marocain. *Geo Observateur* N° 14, Edition Centre Royal de Télédétection Spatiale, Rabat, Maroc.
2. Bakun, A. (1973). Coastal upwelling indices, west coast of North America. US Department of Commerce. NOAA Technical Report, NMFS SSRF-671.
3. Bakun, A. (1975). Daily and weekly upwelling indices, west coast of North America. NOAA Tech. Rep, 16.
4. Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247, 198–201.
5. Barton, E.D, Field, D.B & Roy C. (2013) Canary current upwelling: more or less? *Progr Oceanogr* 116:167–178. <https://doi.org/10.1016/j.pocea.n.2013.07.007>.
6. Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J, Rykaczewski, R. R. & Sydeman, W. J. (2015). Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. *Curr Clim Change Rep* (2015), 1:85–93, DOI 10.1007/s40641-015-0008-4.
7. Benazzouz, A., Demarcq, H., Chagdali, M., Mordane, S., Orbi, A., Hilmi, K., Atillah, A., Larissi, J. , Makaoui, A., Ettahiri, O. & Berraho, A. (2013). Changement à long terme et tendance de l'activité de l'upwelling du système du courant des Canaries à partir de l'imagerie satellite. *Géo Observateur* N° 21, Edition Centre Royal de Télédétection Spatiale, Rabat, Maroc.
8. Benazzouz, A., Mordane, S., Orbi , A., Chagdali, M., Hilmi, K., Atillah, A., Pelegri, Joseph-Luis., & Demarcq, H. (2014). An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-

- based approach – The case of the Canary Current upwelling system. *Continental Shelf Research* Volume 81, 15 June 2014, Pages 38-54.
9. Benazzouz, A., Demarcq, H. & and Gonzallez-Nuevo G. (2015). Recent changes and trends of the upwelling intensity in the Canary Current Large Marine Ecosystem. In: *Oceanographic and biological features in the Canary Current Large Marine Ecosystem*, pp. 321–330, IOC-UNESCO, Paris, France. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series.
  10. Berraho, A., Ettahiri, O., Letourneur, Y., Orbi, A., & Yahyaoui, A. (2005). Importance des paramètres hydrologiques dans la distribution des œufs et larves des petits pélagiques du sud Atlantique marocain. *Cybiu*, 29, (1), p 21-31.
  11. Bessa, I., Makaoui, A., Agouzouk, A., Idrissi, M., Hilmi, K. & Afifi M. (2020). Variability of the ocean mixed layer depth and the upwelling activity in the Cape Bojador, Morocco. *Model. Earth Syst. Environ.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00774-1>.
  12. Bessa, I., Makaoui, A., Hilmi, K. & Afifi M. (2017). Wavelet analysis on upwelling index along the moroccan Atlantic coast. *Eur. Sci. J.*, 13 (12):276
  13. Cropper, T.E., Hanna, E. & Bigg, G.R. (2014). Spatial and temporal seasonal trends in coastal upwelling off Northwest Africa, 1981–2012. *Deep Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 86, 94–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2014.01.007>.
  14. El Aouni, A., Daoudi, K., Yahia, H., Minaoui, K. & Benazzouz A. (2019a). Surface mixing and biological activity in the North-West African upwelling. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, Volume 29, Issue 1, doi 10.1063/1.5067253.
  15. El Aouni, A. (2019b). Lagrangian coherent structures and physical processes of coastal upwelling (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
  16. El Aouni, A., Daoudi, K., Minaoui, K., & Yahia, H. (2020a). Robust Detection of the North-West African Upwelling From SST Images," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, doi: 10.1109/LGRS.2020.2983826.
  17. El Aouni, A., Garcon, V., Sudre, J., Yahia, H., Daoudi, K. & Minaoui, K. (2020b). Physical and Biological Satellite Observations of the Northwest African Upwelling: Spatial Extent and Dynamics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58:2, 1409-1421.
  18. Ekman, V. W. (1905). On the influence of the earth's rotation on the ocean currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 2 (11), 52p.

19. Ikram, H., Tazi, O., Soumoue, L., ElArraj, L., Agouzouk, A., Charib, S., Idrissi, M., Hilmi, K., Makaoui, A. & Ettahiri, O. (2017). Vertical phytoplankton community distribution under seasonal fluctuations of hydrological parameters (Cap Juby, Moroccan Atlantic sea, 2009). *Elixir Biosciences* 110, 2017, 48239-482432017.
20. Larissi, J., Berraho, A., Makaoui, A., Baibai, T., Somoue, S., Benazzouz, A., Zizah, S., Agouzouk, A. & Hilmi, K. (2013). Impact of Inter-annual Coastal Upwelling Variability (2001- 2010) on the Productivity of the Moroccan Atlantic South Area (21° - 26°N), *J Mar Biol Oceanogr* 2013, 2:1.
21. Makaoui, A., Orbi, A., Aristegui, J., Benazzouz, A., Laarissi, J., Agouzouk, A. & Hilmi, K. (2012). Hydrological seasonality of cape Ghir. *Natural Science*, Vol. 4, No.1, 5-13.
22. Makaoui, A., Orbi, A., Hilmi, K., Zizah, S., Larissi, J. & Talbi, M. (2005). L'upwelling de la côte atlantique du Maroc entre 1994 et 1998. *C. R. Geoscience*, 337, 2005, 1518-1524.
23. McGregor, H. V., Dima, M., Fischer, H. W., & Mulitza, S. (2007). Rapid 20th-century increase in coastal upwelling off Northwest Africa. *Science*, 315, 637–639, doi:10.1126/science.1134839.
24. Narayan, N., Paul, A., Mulitza, S. & Schulz, M. (2010). Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century. *Ocean Sci.* 6, 815–823. <http://dx.doi.org/10.5194/os-6-815-2010>.
25. Orbi, A., Hilmi, K., Larissi, J., Zidane, H., Zizah, S., El Moussaoui, N., Lakhdar, J.I. & Sarf, F., (1998). Hydrologie et Hydrodynamique des côtes marocaines: Milieux paraliques et zones côtières. Commissariat Général, EXPO'98.
26. Pauly, D., & Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 374, 255.
27. Schwing, F. B., O'Farrell, M., Steger, J., and Baltz, K., 1996. Coastal Upwelling Indices, West Coast of North America 1946 - 1995, NOAA Technical Memorandum NMFS-SWFSC-23
28. Tamim, A., Minaoui, K., Daoudi, K., Yahia, H., Atillah, A., El Fellah, S., Aboutajdine, D. & El Ansari M. (2019). Automatic detection of Moroccan coastal upwelling zones using sea surface temperature images, *International Journal of Remote Sensing*, 40:7, 2648-2666, DOI: 10.1080/01431161.2018.1528513.
29. Wang, D.W., Gouhier, T.C., Menge, B.A., Ganguly, A.R. (2015). Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change. *Nature* 518. <http://dx.doi.org/10.1038/Nature14235>.
30. Wooster, W.S., Bakun, A., NcLain, D.R., (1976). The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the north Atlantic. *Journal of Marine Research*, 34, 131–141.