



HAL
open science

Influence de la variabilité climatique sur les vagues dans le golfe de Gascogne

Gonéri Le Cozannet, Sophie Lecacheux, Etienne Delvallée, Elodie Charles, Nicolas Desramaut, Déborah Idier, Yann Krien, Rodrigo Pedreros, Carlos Oliveros

► To cite this version:

Gonéri Le Cozannet, Sophie Lecacheux, Etienne Delvallée, Elodie Charles, Nicolas Desramaut, et al.. Influence de la variabilité climatique sur les vagues dans le golfe de Gascogne. Journées Scientifiques et Techniques du Cetmef, Dec 2010, Brest, France. hal-00555168

HAL Id: hal-00555168

<https://brgm.hal.science/hal-00555168>

Submitted on 12 Jan 2011

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

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

Influence de la variabilité climatique sur les vagues dans le golfe de Gascogne

GONERI LE COZANNET, SOPHIE LECACHEUX, ETIENNE DELVALLEE, ELODIE CHARLES, NICOLAS DESRAMAULT, DEBORAH IDIER, YANN KRIEN, RODRIGO PEDREROS ET CARLOS OLIVEROS

BRGM – RNSC/RIC

3, avenue Claude Guillemin –45060 Orléans - France

Tel : 02 38 64 36 14

g.lecozannet@brgm.fr

Résumé

L'impact du changement climatique sur les milieux côtiers est un sujet de préoccupation majeur qui suscite des efforts de recherche importants, notamment afin d'évaluer les conséquences potentielles de l'élévation du niveau marin. Cependant, les observations des paramètres de vagues depuis un demi-siècle révèlent également une variabilité importante de ces grandeurs, ce qui conduit à s'interroger sur leur évolution. La présente analyse porte d'une part sur les liens entre variabilité climatique et climat de vagues local dans le golfe de Gascogne, et examine d'autre part certaines caractéristiques de l'évolution passée du climat de vagues. Elle constitue un préalable nécessaire à l'étude des évolutions potentielles des vagues dans le futur.

De fait, la variabilité du climat de vagues peut être reliée à des anomalies récurrentes et de grande emprise spatiale des champs de pression atmosphériques telles que l'Oscillation Atlantique Nord et d'autres structures de téléconnection de l'Atlantique Nord. L'approche utilisée pour relier les paramètres de vagues locaux à des indices de la variabilité climatique utilise des techniques de classification des états de mer. Elle est appliquée ici à la réanalyse ERA-40 de l'ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts) qui produit des paramètres de vagues, avec notamment un effort de validation important sur le paramètre de hauteur de vagues. Elle permet de mettre en évidence le fait que la hausse des hauteurs significatives de vagues observée au cours de la période 1970-2000 s'explique en premier lieu par des houles énergétiques de nord-ouest qui deviennent plus fréquentes aux dépens des états de mer intermédiaires entre houle et mer de vent et faiblement énergétiques.

Cependant, pour aller plus loin dans la quantification des changements observés dans la réanalyse, il nous semble important de procéder à des analyses multi-modèles afin de caractériser au moins en partie les incertitudes.

Mots clés

Climat de vagues, structures de téléconnections, évolution des hauteurs de vagues, Golfe de Gascogne, Variabilité Climatique, Oscillation Atlantique Nord,

1. Introduction

L'impact du changement climatique sur les milieux côtiers est un sujet de préoccupation majeur qui suscite des efforts de recherche importants, notamment afin d'évaluer les conséquences potentielles de l'élévation du niveau marin. Cependant, les observations des paramètres de vagues depuis un demi-siècle révèlent également une variabilité importante de ces grandeurs, ce qui conduit à s'interroger sur leur évolution.

De nombreuses études présentent une augmentation des hauteurs significatives des vagues en Atlantique Nord. Ces études sont basées sur des observations visuelles (Gulev and Grigoreva 2004), des mesures in-situ (Bacon and Carter 1991), des modèles numériques (Kushnir et al. 1997; Wang and Swail 2001 and 2002, Dodet et al. 2010), et des données altimétriques satellitaires (Woolf et al. 2002). Ces tendances ont été liées aux structures de téléconnexions, qui sont des anomalies de grande emprise et récurrentes de la pression atmosphérique, et notamment à l'Oscillation Atlantique Nord (NAO), dont la phase positive est associée à des traces de tempêtes situées plus au nord et à des vents plus forts au dessus de l'Atlantique Nord. Ainsi, la variabilité du climat de vagues peut être reliée à des anomalies récurrentes et de grande emprise spatiale des champs de pression atmosphériques telles que l'Oscillation Atlantique Nord et d'autres structures de téléconnexion de l'Atlantique Nord.

L'exemple de la côte Aquitaine a été analysé par Dupuis et al. (2006), qui ont mis en évidence une corrélation entre la période de vagues côtières et la NAO. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Dodet et al. (2010), qui présentent la variabilité spatiale des différents paramètres de vagues en Atlantique Nord-Est ainsi que la corrélation de ces paramètres avec la NAO. Or, Castelle et al. (2007) montrent que les vagues jouent un rôle important dans les processus morphodynamiques très actifs qui ont lieu sur les plages de la côte aquitaine. Un suivi décennal de la plage du Truc Vert en Aquitaine a permis par ailleurs à Parisot et al. (2010) de mettre en évidence des périodicités communes dans le signal de la NAO et dans la morphodynamique de cette plage. Ainsi, la variabilité climatique semble avoir un impact non seulement sur les paramètres des vagues, mais peut-être aussi sur la morphodynamique de certaines plages.

Cet article présente une méthode permettant l'analyse de la variabilité du signal de houle et de ses relations avec la variabilité climatique en s'appuyant largement sur les résultats décrits dans Le Cozannet et al. (2010). Dans un second temps, nous présentons deux thématiques de recherches qui nous semblent importantes pour l'analyse des relations entre processus morphodynamiques, variabilité des états de mer et variabilité climatique. Ces deux thématiques bénéficieraient tout particulièrement d'analyses multi-modèles, désormais possibles grâce aux nombreuses réanalyses qui ont été mises en place au cours des 10 dernières années.

2. Analyse de climats de houle sur le long terme

Cette partie résume l'étude décrite de manière plus complète dans Le Cozannet et al. (2010).

2.1 Données

Cette étude utilise la réanalyse ERA-40 de l'ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts): Sterl and Caires (2004) ont utilisé les données de vent à 10m de la réanalyse ERA-40 (Uppala et al. (2005) pour modéliser les paramètres de vagues, notamment la hauteur spectrale significative (qui peut être considérée comme égale à la hauteur significative des vagues en eaux profondes), la période moyenne et la direction moyenne. Ces données montrent une bonne corrélation avec les données de période et de hauteur significative mesurée par la bouée Gascogne de Météo-France (42.2°N/5°W) pendant la période de recouvrement de juillet 1998 à août 2002 : $R^2=0.93$ pour les hauteurs significatives, $R^2=0.75$ pour les périodes, ce qui est comparable aux modèles opérationnels de Bildot et al. (2006). Le lecteur est renvoyé à la partie 3.1 pour une discussion sur l'homogénéité du jeu de données.

2.2 Méthodologie

Afin d'étudier la variabilité de la houle au point de la maille sélectionnée, une classification des trois paramètres de houle est effectuée par l'algorithme des K-Moyennes : cette classification, similaire à celle effectuée par Butel et al. (2002), permet de représenter le signal de houle de manière simplifiée. Butel et al. 2002 et Abadie et al. (2006) proposent ainsi de sélectionner 12 états de mers pour décrire correctement ce signal, ce qui permet d'obtenir les états de mers les plus fréquents ainsi que des états plus énergétiques. D'autre part, un diagramme bivarié (Hs,T), présenté dans Le Cozannet et al. (2010), permet de décrire les différentes classes en fonction d'un certain nombre de critères : hauteur, période et direction, mais aussi énergie et âge des vagues (Carter, 1982).

2.3 Résultats

Le tableau 1 résume les résultats de la classification. Celle-ci fait apparaître un état de mer de vent (WIND SEA), des mers intermédiaires plus ou moins énergétiques (INTER 1 et INTER 2), des houles plus ou moins énergétiques (SWELL 1 et SWELL 2), et deux états correspondant aux plus fortes houles appelé ici STORM.

tableau 1

Résultats de la classification des vagues au point de la maille 45°N / 5°W d'ERA-40

Nom de la classe	Description (Type, direction d'incidence, saisonnalité)	Barycentre de la classe			Occurrence (%)
		Hs (m)	T (s)	D (°)	
A	WIND SEA / ENE / annual	2 m	6.2 s	62°	3.4 %
B	INTER 1 / N / annual	1.6 m	6.6 s	2°	5.4 %
C	INTER 1 / W / mostly spring, summer, autumn	1.8 m	6.9 s	271°	7.1 %
D	INTER 1 / NW / mostly spring, summer, autumn	1.3 m	6.8 s	315°	11.1 %
E	INTER 2 / NW / mostly spring, autumn, winter	2.7 m	8.7 s	319°	7.2 %
F	INTER 2 / W / mostly spring, autumn, winter	3.3 m	8.6 s	271°	7.3 %
G	SWELL 1 / WNW / mostly spring, summer, autumn	1.3 m	8.3 s	294°	16.6 %
H	SWELL 1 / WNW / annual	1.8 m	10.0 s	293°	15.7 %
I	SWELL 2 / WNW / mostly spring, autumn, winter	2.7 m	11.5 s	291°	12.4 %
J	SWELL 2 / WNW / spring, autumn, winter	4.1 m	13.0 s	291°	4.7 %
K	STORM / WNW / spring, autumn, winter	4.8 m	10.1 s	285°	6.5 %
L	STORM / WNW / spring, autumn, winter	7.1 m	11.9 s	285°	2.6%

2.4 Relations avec la variabilité climatique

Les différentes classes de vagues présentées dans le Tableau 1 peuvent être reliées à des téléconnexions, et en particulier la NAO et l'East Atlantic Pattern (EA). Ainsi, on peut relier une anomalie positive de l'occurrence relative des classes les plus énergétiques (SWELL 2 et STORM) à des phases positives de la NAO : par exemple, il y a davantage de houles de type SWELL2 dans les phases positives de la NAO. Une revue plus détaillée de ces correspondances est disponible dans Le Cozannet et al. (2010). Ces relations sont conformes au schéma des vents en Atlantique Nord dans les différentes phases de NAO et de EA, ainsi qu'avec l'étude de Seierstadt et al. (2007) sur les relations entre tempétuosité et téléconnexions.

3. Discussion : vers des analyses multi-modèles

3.1 Impact des inhomogénéités des réanalyses

Lorsque l'on a recours à des réanalyses pour évaluer la variabilité du signal de houle, toute la démarche repose sur la validation effectuée au moyen des données in-situ, mais aussi sur une

hypothèse d'homogénéité du jeu de données sur l'ensemble de la période. De fait, les bouées ne permettent pas de valider les jeux de données sur toute la période pour tous les paramètres de vagues. Or en réalité, le jeu de données ERA-40 n'est pas homogène puisque de plus en plus de données (notamment de télédétection à partir des années 1970) sont intégrées à la réanalyse au cours du temps. Une revue des principales inhomogénéités peut être trouvée dans Caires and Sterl (2001). Afin d'examiner dans quelle mesure le jeu de données de vagues pouvait être utilisé pour différentes simulations, Caires et al. (2004) ont effectué des validations du paramètre de hauteur significative du jeu de données ERA-40 avec des données indépendantes (bouées et altimétrie). Ils ont conclu que le jeu de données pouvait être utilisé pour des analyses de variabilité du climat de vagues. On peut noter en revanche que l'utilisation de ce jeu de données pour des analyses d'extrêmes n'est pas recommandée.

3.2 Orientation des vagues

Dans le cadre du projet ANR-Vulsaco (Idier et al., 2008), Thiébot et al (2010) ont mis en évidence à partir de travaux de modélisation que des changements de directions de vagues pouvaient induire des changements significatifs du système morphodynamique, avec par exemple pour les systèmes à double barre, l'apparition ou disparition de barres en croissants ou de barres transverses. Il apparaît donc prioritaire de rechercher quels modes de variabilité climatique en Atlantique-Nord peuvent se traduire par des modifications de l'orientation de la houle.

Dans l'analyse des climats de vagues de Le Cozannet et al. (2010), on observe des changements conformes à l'intuition : dans des conditions de mer énergétiques, une NAO positive induit davantage de vagues ayant une orientation d'origine nord tandis que les vagues associées à une NAO négative sont orientées davantage de l'Est. Cependant, ces constatations reposent sur des bases très incertaines compte tenu de la résolution angulaire de la modélisation de données de vagues ainsi que de leur validation insuffisante.

En revanche, Dodet et al. (2010) et Charles et al. (2010) ont mis en place des modélisations d'une résolution planimétrique supérieure, qui leur permettent de tirer certains enseignements de leurs réanalyses en termes de directions des vagues. Charles et al. (2010) ont notamment effectué une validation de la réanalyse avec des données de deux bouées directionnelles (Tableau 2) : si la précision angulaire est médiocre, leur bonne exactitude moyenne permet d'envisager une revisite de la manière dont la variabilité climatique en Atlantique nord s'exprime en terme de climat côtier de vagues. Ceci n'est possible que grâce à la bonne résolution spatiale des données de sortie. Dodet et al. (2010) présentent quant à eux les composantes spatiales de la variation d'orientation des vagues ainsi que leur corrélation avec l'indice NAO.

L'analyse de l'influence de la variabilité climatique sur la direction des vagues est donc un sujet d'étude important du fait de son impact potentiel sur la morphodynamique des plages. Cependant, compte tenu de la résolution angulaire réduite des modélisations de vagues des différentes réanalyses, une intercomparaison consistante des résultats des différentes modélisations nous semble essentielle pour améliorer la compréhension des incertitudes associées à une modélisation

individuelle.

tableau 2

Résultats statistiques de la comparaison de la hauteur, période et direction des vagues simulées et des vagues mesurées pour la modélisation de Charles et al. (2010) pour les deux bouées directionnelles de validation (Charles et al. 2010)

	Hauteur significative				Période moyenne T02				Direction pic	
	Biais	Erreur RMS	R ²	Indice de dispersion	Biais	Erreur RMS	R ²	Indice de dispersion	Biais	Erreur RMS
Bouée Yeu 08502 [1998-2000]	-4 cm	28 cm	0,92	16%	0,69 s	1,14 s	0,70	15%	-3 °	24 °
Bouée Minquiers [1992-2000]	-9 cm	26 cm	0,88	20%	0,10 s	1,13 s	0,55	21%	0 °	36 °

3.2 Tendances des hauteurs significatives

Un second thème de recherche qui bénéficierait d'une inter-comparaison de réanalyses de vagues serait celui de la recherche de tendances pour les hauteurs significatives des vagues. Dodet et al. (2010), constatant que leur réanalyse confirmait les tendances à l'augmentation de ce paramètre publiées précédemment (notamment Bacon and Carter 1991 ; Kushnir et al., 1997; Wang and Swail 2001 and 2002 ; Woolf et al. 2002 ; Gulev and Grigoreva, 2004), ont émis l'hypothèse que cette augmentation des hauteurs de vagues pourrait jouer un rôle dans l'érosion assez généralisée (EuroSION, 2004) des plages, notamment celles dont le stock sableux a peu d'échanges avec les cellules sédimentaires voisines.

Le Cozannet et al. (2010) indiquent que la plus grande partie de cette augmentation s'explique par de nouvelles distributions de modes de vagues persistants, et en particulier par une augmentation de l'occurrence relative des modes de houle énergétiques (SWELL 2) au détriment des groupes de vagues intermédiaires faiblement énergétiques (INTER1). En revanche, le niveau de confiance dans la valeur proprement dite de la tendance d'évolution de Hs elle-même est faible. A titre d'exemple, les figures 1 et 2 présentent les caractéristiques spatiales des tendances d'évolutions des paramètres Hs trouvées à partir du jeu de données de vagues d'ERA-40 (Figure 1) et de celui de Charles et al. (2010) qui a été forcé avec les mêmes vents mais avec une stratégie de modélisation différente et des emboitements permettant une meilleure résolution. Des différences évidentes sont visibles, notamment au niveau de la significativité des tendances calculées. En effet, au niveau de la bouée Gascogne, les valeurs respectives de tendances sont 0.008m/an pour la ré-analyse de vagues ERA40 contre 0.004m/an d'après les travaux de Charles et al (2010). La tendance est significative dans les données ERA-40 alors qu'elle ne l'est pas dans les données de Charles et al. (2010). Ici, l'inter-comparaison de modélisations est absolument nécessaire pour quantifier les incertitudes liées à la valeur de la tendance.

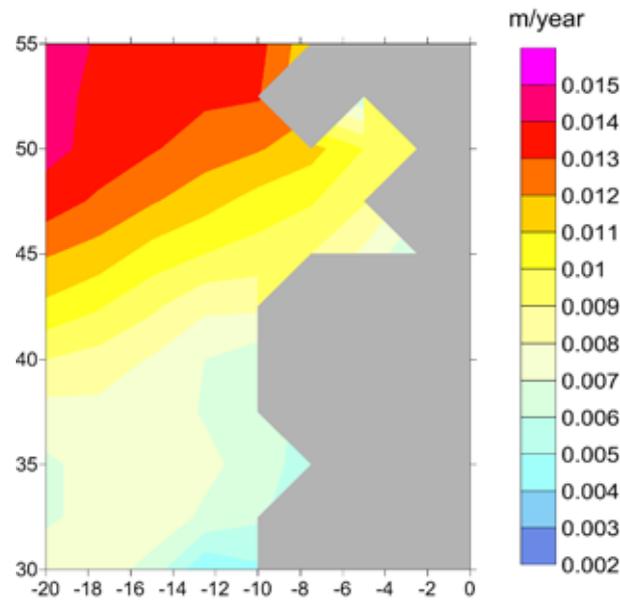


Figure 1. Tendances des hauteurs significatives des vagues selon les données de Sterl and Caires (2004) (Données de vagues ERA-40)

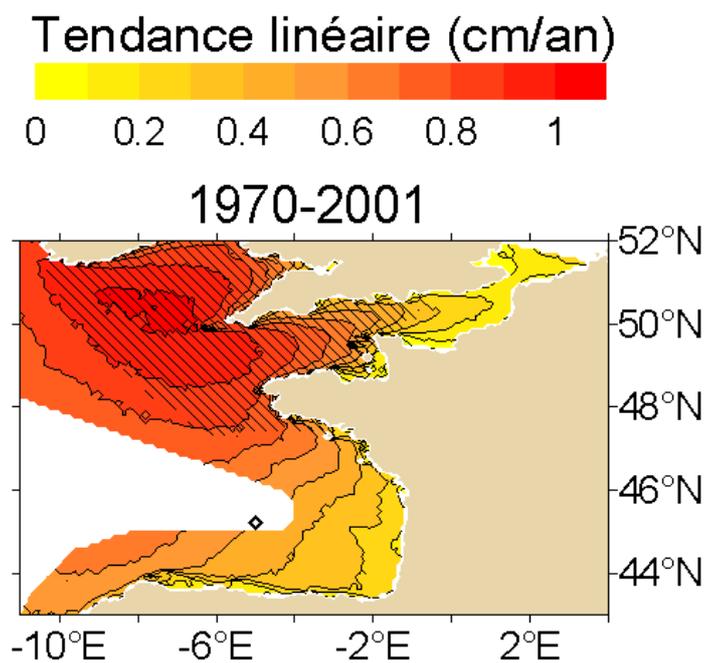


Figure 1. Tendances des hauteurs significatives des vagues entre 1970 et 2001 selon les données de Charles et al. (2010). Les tendances significatives sont indiquées en hachuré

4. Conclusion

Aujourd'hui, plusieurs études ont produit des réanalyses de vagues en Atlantique nord, à différentes résolutions spatiales et temporelles : données issues des vents du National Centers for Environmental Predictions (NCEP) (Swail and Cox, 2000 ; Cox and Swail, 2001 ; Dodet et al.

2010), données de vent issues d'ERA-40 (Sterl and Caires, 2004, Charles et al. 2010), mais d'autres jeux de données existent, notamment réalisés par le CETMEF avec des travaux de modélisations réalisés dans le cadre de ANEMOC (Benoit et Lafon, 2004), mais aussi des travaux menés dans le cadre du projet THESEUS.

L'existence de ces données permet d'envisager de procéder à des analyses multi-modèles pour l'analyse des climats de vagues. Cette démarche est nécessaire pour appréhender les incertitudes associées aux résultats d'analyses menées à partir des différents modèles. Nous pensons que deux domaines en bénéficieraient tout particulièrement : l'analyse des tendances sur la hauteur significative d'une part, la recherche de tendances sur la direction des vagues d'autre part. Pour finir, cette démarche d'analyse multi-modèle est également un préalable nécessaire à la réalisation d'études non plus sur la variabilité climatique passée, mais sur l'impact du changement climatique sur les climats de vagues.

Ainsi, les efforts de modélisation réalisés ces dernières années pour produire et valider des réanalyses des vagues en Atlantique Nord permettent aujourd'hui d'envisager de procéder à des analyses multi-modèles pour étudier l'impact de la variabilité et du changement climatique sur les vagues. De telles analyses seraient très bénéfiques pour mieux estimer l'incertitude dans l'analyse améliorer la compréhension de l'influence de la variabilité climatique sur les états de mer.

4. Remerciements

Les auteurs remercient la direction de la recherche du BRGM (Projet Riscot/CCRC) et la fondation AXA Research Fund pour le financement de la thèse BRGM-CNRM co-encadrée par P. Delécluse et D. Idier. Les auteurs remercient l'équipe ERA-40, A. Braun, D. Salas, Y Mélia, S. PLanton (CNRM), X. Bertin (LIENSs) A. Le Berre et X. Kergadallan (CETMEF), C. Deyts (CELM), F. Ardhuin (SHOM), F. Dupros, F. Boulaya, O. Brivois et T. Bulteau (BRGM) et la région Centre (calculateur PHOEBUS).

5. Bibliographie

Abadie, R. Butel, S. Mauriet, D. Morichon, H. Dupuis (2006): *Wave climate and longshore drift on the South Aquitaine coast*. Cont. Shelf Res., 26, 1924-1939.

Bacon, S. and D.J.T Carter, (1991): *Wave climate changes in the north Atlantic and North Sea*. International Journal of Climatology, 11, 545-558.

Benoit M., Lafon F. (2004) : A nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modeling of wave climate over 25 years, 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'2004), Lisbonne (Portugal), 714-726,.

Bidlot J.-R. and M.W. Holt, (2006): *Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurements from moored buoys*. JCOMM Technical Report, 30.

WMO/TD No.1333. [<ftp://ftp.wmo.int/Documents/PublicWeb/amp/mmop/documents/JCOMM-TR/J-TR-30/J-TR-30.pdf>]

- Butel, R., H. Dupuis, and P. Bonneton,** (2002): *Spatial variability of wave conditions on the French Atlantic coast using in-situ data.* Journal of Coastal Research, 36, 96-108.
- Caires, S. and A. Sterl,** (2001): *Comparative assessment of ERA-40 ocean wave product.* Proc. Of the ECMWF workshop on re-analysis, ERA-40 Project Report Series, 3, 353-368, Reading, 5-9 November 2001. [<http://www.knmi.nl/home/onderzk/oceano/waves/era40/reports/knmi1101.pdf>]
- Caires, S., A. Sterl, J.-R. Bidlot, N. Graham, and V. Swail,** (2004): *Intercomparison of different wind-wave reanalyses.* J. Climate, 17, 1893-1912.
- Carter, D. J. T.,** (1982): *Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results.* Ocean Eng., 9, 17-33.
- Castelle, B., P. Bonneton, H. Dupuis, N. Sénéchal,** (2007): *Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast : A review.* Marine Geology, 245, 141-159.
- Charles.E., Idier D., Pedreros R., Le Cozannet G., Arduin.F., Mallet C., Planton.S.** (2010) *Vagues sur la côte aquitaine : régionalisation dynamique de 1958 à 2002.,* in XIèmes Journées nationales Génie Côtier - Génie Civil - Sables d'Olonne - France - 22-24 juin 2010
- Cox, A. T., and V. R. Swail,** (2001): *A global wave hindcast over the period 1958-1997: Validation and climate assessment.* J. Geophys. Res., 106 (C2), 2313-2329.
- Dupuis, H., D. Michel, and A. Sottolichio,** (2006): *Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades.* J. Mar. Syst, 63, 105-114.
- Gulev, S.K., and V. Grigorieva,** (2004): *Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data.* Geophys. Res. Lett., 31, L24302, doi:10.1029/2004GL021040.
- Idier, D., Parisot, J.P., Ruz, M.H., Certain, R., Bouchette, F., Chateauminois, E., Larroude, P., Robin, M., Poumadère, M., (2008) : *Vulnérabilité de systèmes côtiers sableux face aux changements climatiques et pressions anthropiques, colloque Nouvelles approches sur les risques côtiers* (Paris, 30-31 janvier 2008).
- Kushnir, Y., V. J. Cardone, J. G. Greenwood, and M. A. Cane,** (1997): *The recent increase in North Atlantic Wave Heights.* J. Climate, 10, 2107-2113.
- Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallée E., Desramaut N., Oliveros C., Pedreros R.** (2010) *Teleconnection Patterns influence on sea wave climate in the Bay of Biscay,* Journal of Climate (Accepté)
- Parizot J-P, Capo S, Rihouey D, Howa H, Desmazes F, Fauque L,** (2010) : *Analyse de l'évolution morphodynamique de la plage du Truc Vert (Gironde) sur une période décennale* (pp. 387-396) DOI:10.5150/jngcgc.2010.046-P
- Seierstad, I. A., D. B. Stephenson, N. G. Kvamstø,** (2007): *How usefull are teleconnection patterns for explaining variability in extra-tropical storminess?* Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography, 59(2), 170-181.
- Swail, V. R., and A. T. Cox,** (2000): *On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast.* J. Atmos. Oceanic Technol., 17, 532-545.
- Sterl, A., and S. Caires,** (2004): *Climatology, Variability and Extrema of Ocean Waves - The Web-*

Les 8èmes jST - Brest - 8 et 9 décembre 2010 Réunion des clubs le 10 décembre

based KNMI/ERA-40 Wave Atlas. International Journal of Climatology, 25, 963-997.

Thiébot J., Idier D., Falquès A., Calvete D., Certain R., Garnier R. (2009) : Modélisation de la morphodynamique des barres d'avant-plage par analyse de stabilité linéaire : application à la plage du lido de Sète, La Houille Blanche.

Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J. (2005): *The ERA-40 re-analysis*. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 131, 2961-3012.

Wang X.L., and V.R. Swail, (2001): *Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes*. J. Climate, 14, 2204-2221.

Wang X.L., and V.R. Swail, (2002): *Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40-year wave hindcast using kinematically reanalysed wind fields*. J. Climate, 15, 1020-1035.

Woolf, D.K., P.D. Cotton, and P.G. Challenor, (2002): *Variability and predictability of the North Atlantic wave climate*. J. Geophys. Res., 107, 3145.