

Xynthia est-elle exceptionnelle? Réflexions sur l'évolution et les temps de retour des tempêtes, des marées de tempête, et des risques de surcotes associés sur la façade atlantique française

*Is Xynthia an exceptional event? Reflections on evolution and return period of storms,
storm tides and high surges associated on the French Atlantic coast*

Thierry FEUILLET*, Étienne CHAUCHEAU, Laurent POURINET

* Auteur correspondant : Tel : 33 (0)2 53 48 76 76. Fax : 33 (0)2 53 48 76 50
LETG-Géolittomer-Nantes – UMR 6554 CNRS, Université de Nantes – Campus du Tertre, BP 81 227,
44 312 NANTES Cedex 3, France (thierry.feuillet@univ-nantes.fr) (etienne.chauveau@univ-nantes.fr)
(laurent.pourinet@univ-nantes.fr)

Résumé : À partir de données constituées des vents maximum instantanés quotidiens sur neuf stations de la façade atlantique française, des observations et des traitements statistiques sont menés afin de tenter d'apprécier la fréquence des niveaux d'eau atteints lors de l'épisode Xynthia qui a sinistré les littoraux de Vendée et de Charente-Maritime en février 2010. À cet effet, les vents instantanés de plus de 89 km/h, 102 km/h, et 118 km/h sont analysés. Dans un premier temps, il a été possible d'évaluer l'évolution des tempêtes depuis un demi-siècle sur les neuf stations, dont se dégagent très peu de tendances significatives. Nous avons ensuite croisé ces séries avec les coefficients de marée supérieurs à deux valeurs seuil. Dans un second temps, sur des séries plus restreintes (1984-2010), nous avons procédé à un croisement supplémentaire consistant à ne retenir que les situations où les vitesses de vent maximum sont survenues à moins de trois heures de la pleine mer, afin d'estimer notamment la fréquence et le temps de retour des marées de tempête et des situations présentant un risque de submersion élevé. Il est ainsi montré que des événements comparables à Xynthia sont rares (seulement dix cas observés en 27 ans), voire exceptionnels dans certaines stations, dont La Rochelle fait partie. Les temps de retour des marées de tempête varient fortement selon les sites, de 177 ans à La Rochelle pour une tempête de 140 km/h sachant que la mer est haute, à seulement 5 ans à Belle-Île. Enfin, quelques données factuelles sont présentées afin de rappeler la difficulté de la prévision des valeurs de surcotes, ainsi que l'existence de moyens désormais à disposition pour progresser dans ce domaine.

Abstract: Observations and statistical analyses based on instantaneous maximum winds data along nine stations of the French Atlantic coast, are tested to determinate frequency of sea levels reached during Xynthia disaster which devastated coastal areas of Vendée and Charente-Maritime on February of 2010. Hence, instantaneous winds of more than 89 km/h, 102 km/h, and 118 km/h are analysed. First, we assessed storm evolution since the last fifty years, from which no real trends bring out. Then, we crossed these series with tide coefficients upper than two threshold values. Secondary, with more reduced series (1984-2010), we integrated a third parameter, and selected specific days in which maximum wind speed occurred at less than three hours from high tide. By this way, we can estimate frequency and return time of storm tides and situations breeding high coastal flooding risk. Therefore, we show that events comparable to Xynthia are rare (only ten cases observed during 27 years), or even exceptional in some stations, like at La Rochelle. Return period of storm tides vary according to the sites, from 177 years at La Rochelle for a storm of 140 km/h knowing that high tide occurs, to only five years at Belle-Île. Finally, factual data are presented, underlying the difficulty to predict extreme surge values, but also remind that means available from now can offer opportunities to understand better such dynamics.

Mots clé : tempêtes – surcotes – tendances – temps de retour – côte atlantique – France

Keywords : storms – surges – trends – return period – Atlantic coast – France

INTRODUCTION

Le 28 février 2010, l'événement *Xynthia* a marqué les esprits par sa violence et par le nombre de ses victimes : 47 en France, dont 28 dans le tristement célèbre lotissement « L'Ostréa » à La Faute-sur-Mer. Bien que soulignant la gravité des imprudences commises en matière d'urbanisation (Chauveau *et al.*, 2011), il convient de relativiser la responsabilité de l'homme par le caractère exceptionnel du phénomène naturel : la surcote mesurée a atteint environ 1,50 m dans un large rayon comprenant les secteurs littoraux situés entre La Tranche-sur-Mer, en Vendée, et l'embouchure de la Charente, ce qui constitue une valeur considérable. Ces phénomènes semblent néanmoins récurrents. Très récemment, le 10 mars 2008, la tempête *Johanna* fut la cause de la submersion d'une partie des côtes Nord-Ouest de la France (Caspar *et al.*, 2010; Cariolet *et al.*, 2010), provoquant des inondations, un recul du trait de côte et des dommages sur les infrastructures littorales et les habitations. Si les caractéristiques géomorphologiques et la vulnérabilité des sociétés littorales influent sur l'ampleur des submersions et de leurs conséquences, le moteur de ces événements est bien météo-marin. L'occurrence d'un phénomène anémométrique violent ne suffit pas à provoquer à lui seul l'inondation d'un littoral, de même qu'une tempête modérée peut provoquer d'énormes dégâts quand elle est associée à une marée de vive-eau. C'est donc la conjonction de ces deux phénomènes, l'un météorologique (la tempête, associée aux basses pressions), l'autre marin (la marée de vive-eau), qui assure à l'événement son potentiel catastrophique. Cette combinaison, appelée marée de tempête, est précisément définie comme la montée exceptionnelle du niveau de la mer (due à l'action du vent et aux basses pressions) conjuguée à la marée astronomique (Hontarrède et Galli, 2001). Depuis plusieurs décennies, nombreux sont les auteurs ayant étudié ces phénomènes au travers d'études de cas régionales (Rossiter, 1961; Prandle et Wolf, 1978; Caspar, 1990; Betts *et al.*, 2004; Costa *et al.*, 2004; Caspar *et al.*, 2007; Bernier et Thompson, 2007;

Horsburgh et Wilson, 2007) ou de la modélisation (Daniel *et al.*, 2001; Lowe *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2003; Wolf, 2009).

Les marées de tempête provoquent ainsi des phénomènes de surcote, qui correspondent précisément à la différence entre le niveau de la mer mesuré et le niveau de la mer prédit. Ces surcotes sont directement à l'origine des submersions littorales. L'analyse de l'évolution de leur fréquence présente donc un intérêt majeur en termes de gestion du risque. Plusieurs études ont ainsi été consacrées aux temps de retour des surcotes sur le littoral français (Simon, 1994; Bouligand et Pirazzoli, 1999; Pirazzoli, 2000; Costa *et al.*, 2004; Pirazzoli *et al.*, 2004, 2006; Nicolle, 2006; Pirazzoli et Tomasin, 2007; Suanez *et al.*, 2007; Ullmann et Pirazzoli, 2007; Pouvreau, 2008; Tomasin et Pirazzoli, 2008; Wöppelmann *et al.*, 2008). Ces auteurs s'appuient principalement sur les enregistrements marégraphiques disponibles (notamment à partir du marégraphe de Brest en fonction depuis 1860) associées aux données atmosphériques. Leurs résultats ont globalement montré que la fréquence des facteurs atmosphériques qui contribuent aux surcotes (dépressions atmosphériques, vents d'ouest) a eu tendance à baisser ou à se produire durant des périodes plus courtes, résultant en une légère baisse des surcotes (Pirazzoli, 2000; Pirazzoli *et al.*, 2004) ou en une relative stagnation de la fréquence des submersions sur le long terme (Costa *et al.*, 2004). Néanmoins, l'observation récente de surcotes se produisant en même temps qu'une forte marée astronomique s'est traduite par une légère augmentation des surcotes extrêmes, par exemple à Brest dans la seconde moitié du xx^e siècle (Bouligand et Pirazzoli, 1999), dans le Golfe du Lion (Ullmann et Pirazzoli, 2007), ou encore en mer d'Irlande (Pye et Blott, 2008), bien que ce constat soit nuancé par Fichaut et Suanez (2008) sur la période récente (baisse de la fréquence des épisodes morphogènes entre 1990-2002). Or, ce sont ces événements extrêmes qui présentent le potentiel catastrophique le plus élevé, comme ce fut le cas lors du passage de *Xynthia*, seulement

trois heures avant la pleine mer d'un coefficient de marée égal à 102. Afin de rendre compte du temps de retour de ces événements extrêmes, il est donc indispensable de prendre en considération, de façon simultanée, l'événement atmosphérique et l'événement marégraphique. On se trouve alors, d'un point de vue méthodologique, confronté à deux principaux problèmes : (i) d'une part, les séries marégraphiques en France restent éparées, dans le temps comme dans l'espace. Sur la façade atlantique française, il existe relativement peu de séries marégraphiques, et qui ne fournissent majoritairement que des périodes d'enregistrement inférieures à 20 ans, à des époques se chevauchant. Il est donc délicat d'en extrapoler des temps de retour fiables ; (ii) d'autre part, le calcul de la probabilité d'occurrence simultanée de phénomènes supposés indépendants (tempêtes, fortes marées astronomiques, pleine mer) nécessite des approches statistiques spécifiques. Ainsi, Cariolet *et al.* (2010), dans leur réflexion sur les temps de retour d'une marée de tempête telle que *Johanna*, précisent qu'il « est [...] impossible pour le moment d'estimer la période de retour de la conjonction des trois éléments houle-marée-surcote » et qu'il « serait intéressant dans le futur de mettre en place une méthode permettant d'estimer la période de retour d'une telle combinaison de phénomènes sur les côtes du Nord-Ouest de la France ».

Nous avons tenté, dans cette étude, de contourner ces deux problèmes afin d'estimer le temps de retour d'un événement météo-marin semblable à *Xynthia* sur la façade atlantique française. Nous avons tout d'abord exploré un jeu de données anémométriques sur neuf stations situées entre Brest et Biarritz durant la seconde moitié du xx^e siècle, afin de définir le temps de retour des tempêtes. Nous avons ensuite associé ces données de tempête avec l'occurrence de pleine mer lors de fortes marées astronomiques, et avons ainsi estimé des temps de retour de cette conjonction d'éléments à partir de lois de probabilité conditionnelle. Cette démarche, originale, va permettre de se faire une idée de la fréquence de ce type d'évènement susceptible de provoquer des submersions marines conséquentes sur la façade atlantique française. Le fait de ne tenir compte que des facteurs contribuant aux surcotes extrêmes (vent, fortes marées, pleine mer) plutôt que des surcotes elles-mêmes permet (i) d'élargir le champ spatio-temporel des données considérées et

(ii) d'intégrer la probabilité d'occurrence d'un événement tempétueux en même que la marée haute, ce qui n'était pas le cas des études précédemment citées. Néanmoins, ce choix comporte également ses limites. D'une part, comme seuls les facteurs de surcotes sont pris en compte, on ne peut pas aboutir à des temps de retour de surcotes chiffrées. D'autre part, nous ne considérons que les événements strictement anémométriques et marégraphiques, et non les facteurs géographiques, géomorphologiques ou bathymétriques, si bien que les extrapolations en termes de submersions littorales ne peuvent être généralisées. Ces éléments seront néanmoins discutés, notamment à la lumière de la série de travaux réalisés sur la tempête *Johanna*.

QUELLES DONNÉES ? QUELLES MÉTHODES ?

Données de vents et de marée sur la façade atlantique

Données de vent maximum instantané

Cette étude s'appuie sur l'analyse des séries de vent maximum instantané (VMI) quotidien de neuf stations Météo France situées sur la façade atlantique. Le choix du VMI, également retenu par Drevet (2002), présente l'avantage de considérer tout événement tempétueux (même ponctuel), contrairement aux moyennes horaires qui impliquent un lissage des données. Nous précisons par ailleurs que la direction des vents n'a pas été considérée, dans la mesure où l'échelle d'analyse choisie (de Brest à Biarritz) n'y était pas adaptée. En outre, l'intérêt de la direction du vent est relatif quand on sait sa variabilité au cours d'un événement tempétueux, au passage de la dépression. Finalement, la liste et les caractéristiques des stations figurent dans le tableau 1. La longueur des séries varie de 35 ans (Biscarosse) à 61 ans (Brest). Elles présentent des pourcentages de données manquantes relativement faibles (maximum de 3,5 % à Belle-Île, soit environ 700 manques sur près de 23 000 données quotidiennes). En prenant en considération l'échelle de Beaufort (Bessemoulin, 2002), nous avons extrait des données les vents supérieurs à 89 km/h (tempête), à 102 km/h (forte tempête) et à 118 km/h (ouragan), ce qui représente ainsi trois classes distinctes. L'analyse des métadonnées (tableau 1) met en valeur un certain nombre de

changements d'appareils de mesure anémométrique au cours des différentes périodes, en particulier à Brest (six changements). Il convient dans ce cas de vérifier statistiquement si les dates de changements d'appareils se traduisent dans les séries par des inhomogénéités, autrement dit des sauts de moyennes ou des ruptures de tendance. Plusieurs méthodes ont été décrites dans la littérature afin d'identifier ces éventuelles inhomogénéités (Mestre, 2000; Beaulieu *et al.*, 2007). Nous avons choisi ici d'appliquer des tests de détection de rupture de tendance au sein des séries : tests de Pettitt (1979) et de Buishand (1984). Les résultats indiquent que les dates de changement d'appareils ne correspondent pas aux dates de rupture détectées, à l'exception de la station de Biscarosse (rupture en 1995). Les dates de rupture détectées ont donc une origine naturelle. Par ailleurs, les délocalisations de stations ont été modestes ou absentes selon les sites, à part pour le Cap Ferret, qui a subi un déplacement de 8 300 m en 1976. Cette date ne correspond pas non plus, selon les deux tests appliqués, à une rupture de tendance. Nous estimons ainsi dans l'ensemble que ces éléments n'empêchent pas l'exploitation directe du jeu de données.

Pleine mer et marée astronomique

L'association des événements de vents forts aux coefficients de marée et aux horaires de pleine mer a été réalisée à l'aide du logiciel de prédiction

de marée du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), qui se base sur la méthode harmonique. Lorsque Météo France ne dispose pas de station d'enregistrement équivalente aux ports du SHOM, comme c'est le cas pour Montoir, c'est le port le plus proche qui a été considéré (Saint-Nazaire pour Montoir).

Méthode de détection de tendances dans l'évolution des tempêtes : test de Mann-Kendall

La détection de tendances monotones dans les séries de tempête a été réalisée à l'aide du test non-paramétrique de Mann-Kendall (Kendall, 1938; Mann, 1945). Ce test est fondé sur la corrélation de rang. L'hypothèse nulle H_0 est que les variables suivent une distribution aléatoire. L'hypothèse alternative H_1 est une tendance significative. Pour chaque élément x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de la série, on calcule le nombre n_i d'éléments précédents qui lui sont inférieurs. La statistique de tendance est la grandeur :

$$t - \sum_{j=1}^n n_j$$

qui, sous l'hypothèse nulle du caractère aléatoire, a pratiquement une distribution normale pour $n \geq 10$, dont la moyenne et la variance sont données par :

Station	Début	Fin	Années	Latitude	Longitude	Altitude	Données manquantes (%)	Métadonnées	
								Changement appareils	Délocalisation (dist. horiz.)
Brest	1949	2010	61	48,26	-4,24	94	0,1	1967-1971-1989-1994-1999-2007	1994 (200 m)
Lorient	1952	2010	58	47,45	-3,26	45	0,3	1972-1989-1994	2010 (800 m)
Belle-Île	1956	2010	54	47,17	-3,13	34	3,5	1974-1994	Aucune
La Rochelle	1958	2010	52	46,09	-1,09	4	0,1	1972-1983-1994	1967 (300 m)
Montoir	1957	2009	52	47,18	-2,09	3	0	2009	2009 (500 m)
Biarritz	1958	2009	51	43,28	-1,32	71	0	1971-1995	Aucune
Yeu	1959	2010	51	46,41	2,19	32	2,7	1975-1994	Aucune
Lège	1970	2010	40	44,37	-1,14	9	0,9	2009	1976 (8 300 m)
Biscarosse	1975	2010	35	44,25	-1,14	35	0,7	1995-2008	Aucune

Tableau 1 : Données utilisées (vent instantané maximal instantané quotidien) et métadonnées associées
Data used (daily maximum wind) and metadata associated



$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4}$$

$$\text{var}(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

La statistique réduite du test est donnée par :

$$u(t) = \frac{[t - E(t)]}{\sqrt{\text{var}(t)}}$$

Si l'on détermine la probabilité α_1 à l'aide de la table de la loi normale réduite telle que $\alpha_1 = P(|u| > |u(t)|)$, l'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau α_0 selon que l'on a $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$.

Croisement des fortes tempêtes et des gros coefficients de marée

Nous avons par la suite porté notre attention sur les situations caractérisées par les vitesses de vent maximums les plus forts (vitesse maximale supérieure ou égale à 33 m/s, soit 118,8 km/h, correspondant au seuil « ouragan » de l'échelle de Beaufort). La raison de ce choix tient au fait que dans la survenue des catastrophes, seuls des vents forts sont capables de générer des phénomènes de submersion importants, ayant des impacts potentiels notables.

Sur la base de ces échantillons réduits (de 11 à 182 événements selon les stations, tableau 2), nous avons ensuite sélectionné les situations caractérisées par des coefficients de marée supérieurs ou égaux à 80, puis supérieurs ou égaux à 100, ce qui nous place dans des circonstances voisines des conditions de la tempête *Xynthia* (pour rappel : coefficient de 102 et vitesse maximale enregistrée de 133 km/h à La Rochelle). Enfin, pour la période sur laquelle nous disposons des données horaires de vents maximum, depuis 1984, nous avons écarté dans ces situations extrêmes celles où l'écart entre l'heure de la pleine mer et celle des vents maximum était supérieure ou égal à 3 heures. Ce seuil de 3 heures mérite d'être discuté. En effet, une différence de 3 heures entre celle de la pleine mer et celle du vent maximum mesuré peut paraître trop élevée, sachant qu'à trois heures d'intervalle, nous sommes presque à mi-distance entre la haute mer et la basse mer. C'est le suivi au pas de temps horaire de l'épisode *Xynthia* qui nous a poussé à retenir ce seuil. De fait, il se trouve que le décalage horaire entre le vent maximum mesuré à La Rochelle (1 h 24) et la pleine

mer (4 h 26) est précisément de 3 h 02. Lors de tempêtes aussi fortes, les différences de vitesses de vent maximum au pas de temps horaire sont réduites. En l'occurrence, le 28 février entre 4 heures et 5 heures (heure de la pleine mer), la vitesse maximum du vent mesurée était encore de 29 m/s à La Rochelle, contre 37 trois heures plus tôt, au plus fort de la tempête.

Estimation du temps de retour des marées de tempête : l'apport des probabilités conditionnelles

Au final, l'objectif est d'analyser la probabilité d'occurrence des marées de tempête. On entend par cette expression des événements de vent s'étant produits à plus ou moins trois heures de la pleine mer, et qui sont donc théoriquement associés à des phénomènes de surcotes.

On décide de s'appuyer sur la distribution conditionnelle des tempêtes, c'est-à-dire sur les événements de grand vent sachant que la mer était haute. Afin d'estimer le temps de retour de ces marées de tempête, nous avons utilisé la méthode du renouvellement (Cox, 1965 ; Lang *et al.*, 1997), qui permet d'examiner la distribution d'une variable au-dessus d'un seuil. Ce choix permet de considérer davantage de valeurs que par une analyse des maxima annuels, comme c'est par exemple le cas avec la loi des valeurs extrêmes. Le seuil en question est ici celui de la tempête, soit 89 km/h. Un seuil supérieur réduirait trop fortement le nombre d'événements, notamment dans les stations les moins ventées.

Cette méthode du renouvellement prend en compte deux lois de probabilité : (1) celle sur la fréquence d'occurrence $F(k)$, qui s'intéresse au temps T_i (temps entre deux événements) et qui permet d'estimer la probabilité d'observer k événements dépassant le seuil s . Considérant que la variable étudiée suit un processus stationnaire (caractéristiques statistiques indépendantes du temps), le nombre d'événements peut être décrit par la loi de Poisson $P(\lambda)$ et la distribution des temps entre les événements par la loi exponentielle $Exp(1/\lambda)$; (2) et celle sur l'intensité des phénomènes $G(C|s)$, c'est-à-dire la probabilité que la variable X soit supérieure au seuil s mais ne dépasse pas la valeur C (donc $C > s$). Si $G(C|s)$ est proche de 1, on obtient une

expression proche des résultats de la théorie des valeurs extrêmes (Ancey, 2006) :

$$P(C) = P(X \leq C|s) \approx 1 - \frac{n_s}{n_a} (1 - G(C|s))$$

Où $n_s = \sum kP(k)$ est le nombre moyen d'événements par unité de temps dépassant le seuil s et n_a le nombre d'années. Avec $F(k|\lambda)$ et $G(C|s) = \text{Exp}(x - s|\mu)$, on obtient une loi approchée de la forme, pour T grand :

$$C \approx s + \frac{\ln \lambda}{\mu} + \frac{1}{\mu} \ln T$$

On obtient enfin l'estimation des paramètres λ et μ par la méthode du maximum de vraisemblance :

$$\lambda = \frac{n_s}{n_a} \text{ et } \mu = \frac{1}{C - s}$$

RÉSULTATS

Fréquence et évolution des tempêtes sur la façade atlantique : absence de tendances significatives et généralisées

Le nombre et la fréquence des vents supérieurs ou égaux à 33 m/s (118,8 km/h) sur la façade atlantique française sont exprimés dans le tableau 2. Ainsi, tant en valeur absolue qu'en valeur relative, les stations de Belle-Île, Yeu et Cap Ferret sont fréquemment exposées à des vents très forts. À La Rochelle, des vents supérieurs ou égaux à 33 m/s sont atteints ou dépassés une année sur deux. Pour ce qui est d'une estimation statistiquement valide de l'évolution

des tempêtes plus banales, l'application du test de Mann-Kendall sur les séries complètes de ces neuf stations indique que quatre d'entre elles présentent une tendance dans l'évolution du nombre d'épisodes supérieurs à 89 km/h et à 102 km/h (Montoir, Lorient, Biarritz et Biscarosse). Ces tendances sont toutes significativement positives au seuil de 95 %. Une cinquième station, La Rochelle, ne présente une tendance que pour les événements supérieurs à 89 km/h et non à 102 km/h, avec la particularité supplémentaire que cette tendance est significativement négative (seuil de 95 %). Les quatre dernières stations présentent des séries aléatoires (aucune tendance détectée, tableau 3 et figure 1).

Cette première analyse a été réalisée sur des périodes complètes, mais hétérogènes. Or, on connaît l'importance du choix des bornes d'une série temporelle sur son analyse statistique. C'est particulièrement le cas si les premières années de la période sont très ventées. Il a donc été décidé d'homogénéiser les périodes considérées afin de pouvoir correctement comparer les stations, en dépit d'une perte de données. Dans la mesure où huit des neuf stations ont des séries complètes entre 1970 et 2009, c'est cette période de 39 ans qui a été choisie. On considère que cette durée est suffisamment longue pour caractériser des tendances. En outre, ce choix tient compte de la mise en garde formulée par Drevet (2002), selon laquelle le réseau météorologique français a connu un processus de remplacement très important de ses capteurs de vent dans les années 1970, en passant de l'anémomètre de type Papillon à l'anémomètre fréquence métrique à coupelles. Or, « la Direction des systèmes d'observa-

	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h	Nombre de jours de VMI > ou = à 118,8 km/h par an
Brest (1949-2010)	28	0,45
Belle-Île (1956-2010)	182	3,31
Lorient (1952-2010)	23	0,39
Montoir (1957-2009)	13	0,24
Yeu (1959-2010)	142	2,73
La Rochelle (1958-2010)	28	0,53
Cap Ferret (1970-2010)	85	2,07
Biscarosse (1975-2010)	35	0,97
Biarritz (1956-2009)	11	0,20

Tableau 2 : Analyse fréquentielle des événements de vent supérieur à 118,8 km/h sur les neuf stations de la façade atlantique française
Frequency analysis of wind events upper than 118,8 km/h on the nine stations of the French Atlantic coast

tions de Météo-France estime que [...] les anémomètres de type Papillon avait pour conséquence une surestimation des vitesses des rafales de l'ordre de 5 % par rapport aux capteurs actuellement utilisés » (Drevet, 2002). Cet aspect, vérifié ici sur les stations étudiées (remplacement des modèles Papillon entre 1971 et 1975), peut perturber l'analyse des tendances.

L'application du même test sur la période 1970-2009 montre justement des résultats différents (tableau 3). Seules deux stations présentent une tendance (significativement positive) : Montoir et l'île d'Yeu, les six autres séries étant aléatoires. Cela confirme l'influence considérable de la borne inférieure de la période. Il convient également de noter qu'à Biarritz et à Lorient, le nombre d'épisodes supérieurs à 102 km/h montre une tendance positive. Ces résultats sont néanmoins considérés avec précaution, en raison du faible nombre de ces événements dans ces stations.

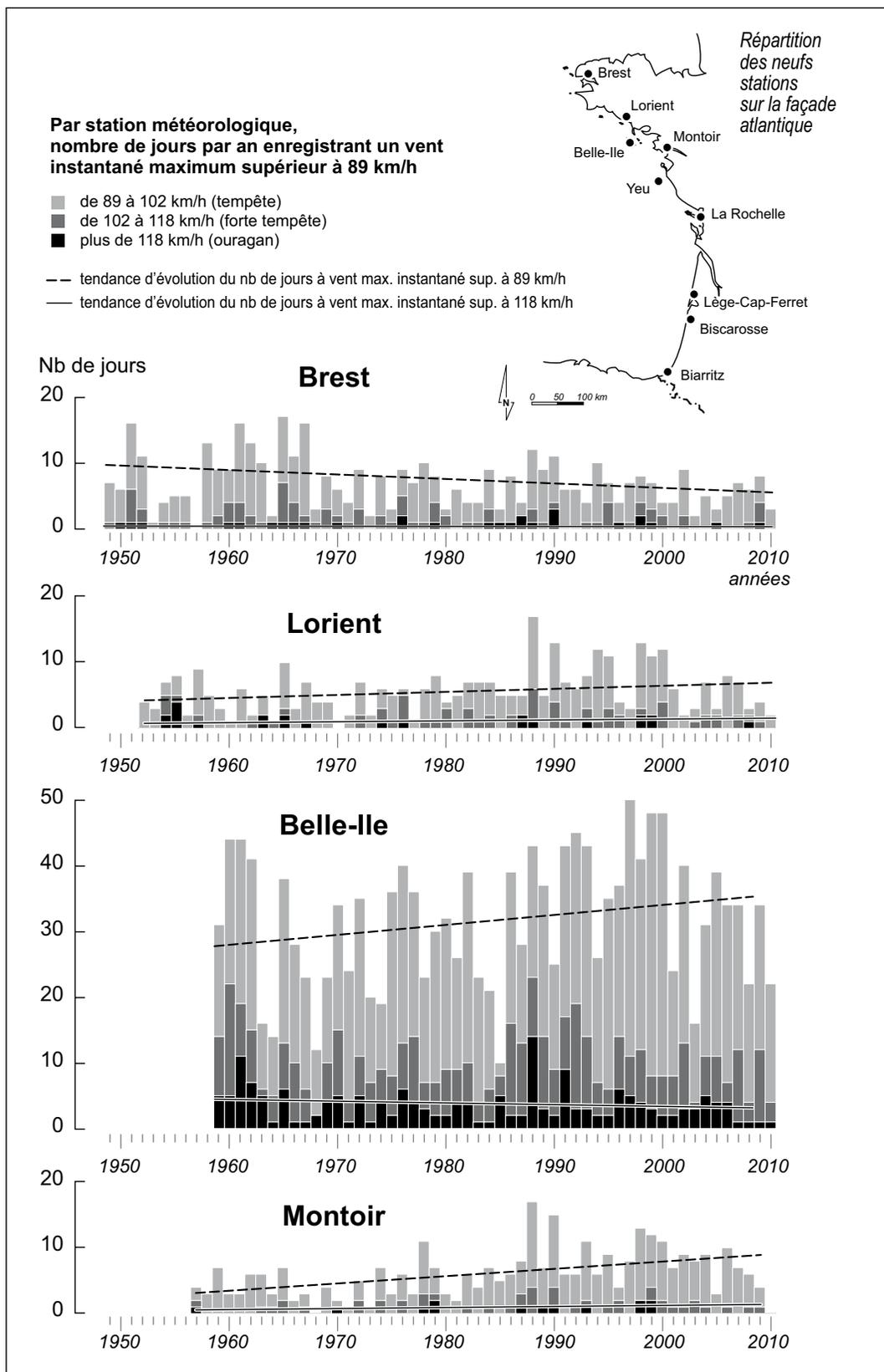
Le résultat que l'on peut tirer de ces analyses est que le nombre de tempêtes sur la façade atlantique à l'échelle semi-séculaire ne montre pas de tendances significatives et généralisées. La distribution des épisodes est majoritairement aléatoire en raison d'une forte variabilité interannuelle, en particulier depuis les quatre dernières décennies. La station de l'île d'Yeu fait exception, en présentant une réelle inversion de tendance à partir des années 1970, qui s'explique par un nombre très important d'épisodes de tempêtes dans les années 1960 : sur la période 1959-2010, 37 % des événements supérieurs à 89 km/h ont eu lieu entre 1959 et 1970. Pour autant, il convient de préciser que les tests de détection de rupture de tendance appliqués à cette série (Buishand, 1984 ; Pettitt, 1979) ont révélé des résultats négatifs. Mise à part cette station, ainsi que celle de Biscarosse, mais qui ne débute qu'en 1975, nos résultats diffèrent donc de ceux de Drevet (2002), qui stipulent à l'échelle de la France que les tempêtes ont eu tendance à augmenter sur la période 1970-1999. Cette différence peut en partie s'expliquer par une baisse relative des épisodes entre 2000 et 2009 par rapport à la décennie précédente. Cela rejoint en partie les résultats exposés par des géomorphologues ayant étudié l'évolution récente d'épisodes morphogènes (Hallégouët et Hénaff, 2006 ; Fichaut et Suanez, 2008 ; Pye et Blott, 2008), bien qu'un épisode morphogène tient

compte de la marée de vive-eau en plus de la tempête. Fichaut et Suanez (2008) notent ainsi une fréquence importante d'événements morphogènes entre 1979 et 1990, alors que la période 1990-2002 est marquée par une diminution de ces épisodes

Fréquence des conjonctions fortes tempêtes/gros coefficients de marée

En termes de fréquence, le croisement des situations de vents très forts associés à des coefficients de marée atteignant ou dépassant la valeur de 80 le même jour indique les résultats suivants (tableau 4) : la conjonction des vents de plus de 118,8 km/h par coefficient de 80 et plus la même journée place là encore les deux îles largement en tête, avec une période de retour proche de 11 mois à Belle-Île, et de 10 mois à Yeu. À La Rochelle, cette période de retour est très légèrement inférieure à quatre années, et à Biarritz, elle atteint 50 ans. Pour ce qui est du croisement des situations de vents très forts associés à des coefficients de marée atteignant ou dépassant la valeur de 100 le même jour, les résultats sont désormais les suivants (tableau 4) : la conjonction des vents de plus de 118,8 km/h par coefficient de 100 et plus la même journée (mais sans précision horaire) place toujours les deux îles en tête, avec une période de retour légèrement supérieure à quatre ans. La Rochelle se situe juste derrière avec une période de retour de onze années et un mois. À Montoir et à Biarritz, de telles conjonctions n'ont pas été observées sur les périodes d'observations, soit depuis un demi-siècle (figure 2).

Nous intégrons désormais les données horaires depuis 1984, lors des situations où les vents maximaux étaient au minimum de 118,8 km/h, les coefficients de marée de 80 et plus, et la différence horaire entre vent maximum mesuré et haute mer inférieure ou égale à 3 heures. Cela nous amène aux résultats présentés dans le tableau 5 : de telles configurations se sont produites en moyenne deux années sur trois à Belle-Île, une sur deux à Yeu, une sur quatre à Cap Ferret, une sur sept à Biscarosse, une sur neuf à La Rochelle. Ce type de situation est déjà susceptible de provoquer des surcotes conséquentes, mais bien entendu variables en fonction des configurations bathymétriques et morphologiques. Si nous prenons maintenant en compte les



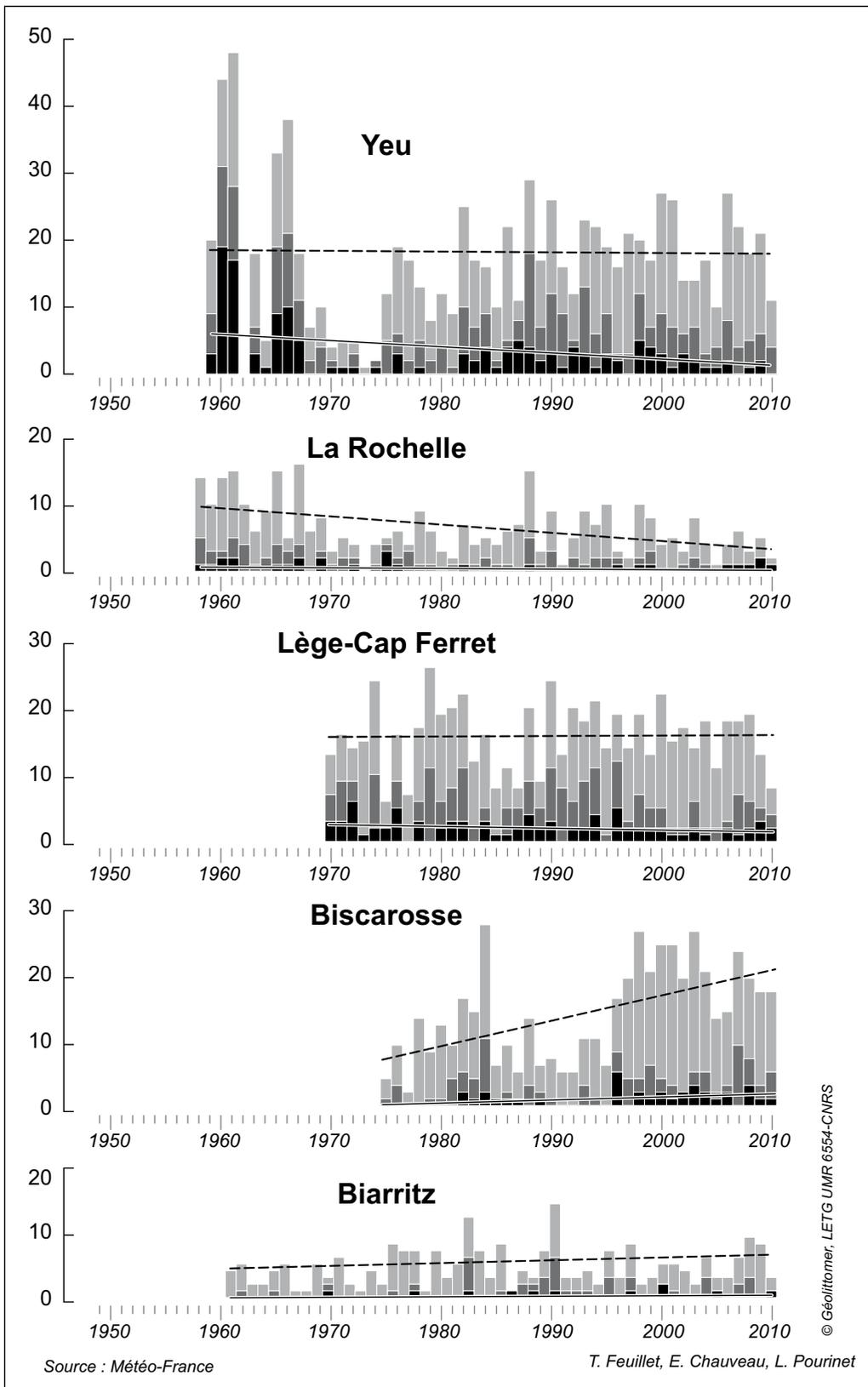


Figure 1 : Inventaire des jours de tempête pour neuf stations de la façade atlantique et tendances d'évolution

Inventory of storm days for nine meteorological stations along the Atlantic coast and evolution tendencies

Station	Période	Type	Tendances	u(t)
Belle-Île	1959-2010	Nb jrs > 89 km/h	non	1,35
		Nb jrs > 102 km/h	non	-0,19
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	1,61
		Nb jrs > 102 km/h	non	0,58
Brest	1949-2010	Nb jrs > 89 km/h	non	-1,10
		Nb jrs > 102 km/h	non	0,8
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	0,68
		Nb jrs > 102 km/h	non	0,91
Yeu	1959-2010	Nb jrs > 89 km/h	non	1,5
		Nb jrs > 102 km/h	non	0,92
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	oui***	3,77
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	2,62
Montoir	1957-2009	Nb jrs > 89 km/h	oui***	4,65
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	4,54
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	oui***	3,45
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	2,59
Lorient	1952-2010	Nb jrs > 89 km/h	oui**	2,39
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	3,61
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	1,44
		Nb jrs > 102 km/h	oui*	1,9
La Rochelle	1958-2010	Nb jrs > 89 km/h	oui**	-2,30
		Nb jrs > 102 km/h	non	-0,99
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	0,96
		Nb jrs > 102 km/h	non	1,46
Biarritz	1958-2009	Nb jrs > 89 km/h	oui**	2,1
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	5,65
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	1,6
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	4,12
Lège	1970-2010	Nb jrs > 89 km/h	non	0,58
		Nb jrs > 102 km/h	non	-0,52
	1970-2009	Nb jrs > 89 km/h	non	0,98
		Nb jrs > 102 km/h	non	-0,35
Biscarosse	1975-2010	Nb jrs > 89 km/h	oui***	3,6
		Nb jrs > 102 km/h	oui***	3,49

Tableau 3 : Résultats du test de Mann-Kendall sur les neuf stations de la façade atlantique, sur les séries complètes et sur la période 1970-2009. Le signe de la statistique u(t) indique le caractère positif ou négatif de la tendance. Plus $|u(t)|$ est élevé, plus la tendance est significative.

Mann-Kendall test results on the nine stations of the French Atlantic coast, on the complete data and the 1970-2009 period. The u(t) statistic sign indicates the trend slope. The higher the $|u(t)|$, the more the trend is significant.

données horaires depuis 1984, que nous retenons les situations où les vents maximaux étaient au minimum de 118,8 km/h, les coefficients de marée de 100 et plus, et la différence horaire entre vent maximum mesuré et haute mer inférieure ou égale

à 3 heures, nous nous trouvons dans des configurations de vent, de marée, et de coïncidence horaire très proches de celle observée lors de Xynthia pour les régions littorales de Vendée et de Charente-Maritime (tableau 5). Ainsi, on compte dix situations potentiellement susceptibles de générer des surcotes majeures depuis 1984, et donc des submersions côtières plus ou moins étendues sur la façade atlantique française.

Il convient de noter que Xynthia n'apparaît dans cette liste qu'à La Rochelle. Ailleurs, soit le décalage horaire était supérieur à 3 heures (Biscarosse), soit la vitesse des vents n'atteignait pas 118,8 km/h (autres stations). À l'opposé, une tempête remplit ces trois conditions extrêmes dans trois sites différents, celle du 23 novembre 1984, avec des vents maximaux instantanés de 34, 35 et 37 m/s respectivement à Yeu, Brest et Belle-Île, par coefficient de 102. Par ailleurs, les très violentes tempêtes de fin décembre 1999 n'apparaissent qu'à Belle-Île en raison de mauvaises coïncidences horaires entre pleines mers de vives-eaux et vitesses maximales de vents enregistrés.

Le temps de retour des marées de tempête : une forte hétérogénéité spatiale

L'analyse des probabilités d'occurrence des tempêtes (> 89 km/h) associées à la pleine mer a été réalisée sur les neuf stations pour la période 1984-2010, les services de Météo-France n'ayant pas encore sauvegardé les données horaires du vent avant 1984. Cette période de 27 ans est trop courte pour caractériser des tendances, mais suffisante pour estimer des temps de retour.

On constate que les temps de retour des marées de tempête varient fortement selon les stations (figure 3). La figure 3 illustre l'exemple du temps de retour d'une tempête de 140 km/h, c'est-à-dire à peu près de l'ordre de grandeur de Xynthia, sachant que la mer est haute. Il varie de 5 ans à Belle-Île à 177 ans à La Rochelle. La figure 4 illustre également la valeur de la tempête centennale sachant que la mer est haute (quel que soit le coefficient de marée). Celle-là varie de 135 à 181 km/h selon les sites. Cette variabilité est à nouveau à mettre en relation avec la situation géographique des stations et en particulier avec leur degré de protection face



	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 80	Nombre de jours de VMI > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 80 par an.	Nombre de jours à vent maximum instantané (VMI) > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 100	Nombre de jours de VMI > ou = à 118,8 km/h et coefficient de marée > ou = à 100 par an.
Brest (1949-2010)	13	0,21	2	0,03
Belle-Île (1956-2010)	61	1,11	13	0,24
Lorient (1952-2010)	9	0,15	3	0,05
Montoir (1957-2009)	5	0,09	0	-
Yeu (1959-2010)	61	1,17	12	0,23
La Rochelle (1958-2010)	15	0,28	5	0,09
Cap Ferret (1970-2010)	27	0,66	3	0,07
Biscarosse (1975-2010)	9	0,25	2	0,06
Biarritz (1956-2009)	1	0,02	0	-

Tableau 4 : Analyse fréquentielle des événements de vent supérieur à 118,8 km/h associés à un coefficient de marée supérieur ou égal à 80 et 100 sur les neuf stations de la façade atlantique française

Frequency analysis of wind events upper than 118,8 km/h associated with tide coefficient upper than 80 and 100 on the nine stations of the French Atlantic coast

aux vents d'ouest. Ainsi, ce sont les deux îles (Belle-Île et l'île d'Yeu) qui sont les plus exposées et qui présentent en conséquence les temps de retour les plus faibles.

DISCUSSION

Contribution à la caractérisation des surcotes et des submersions sur la façade atlantique française

Les connaissances sur les marées de tempêtes, la prévision des surcotes et les risques de submersions marines constituent des enjeux sociétaux majeurs (Costa *et al.*, 2004 ; Caspar *et al.*, 2010). Les traitements statistiques présentés dans cette étude permettent de confirmer certains résultats établis par d'autres auteurs, notamment en ce qui concerne l'absence de tendance nette dans l'évolution des tempêtes au cours des dernières décennies (Drevet, 2002). Elle a également permis de confirmer l'idée selon laquelle les fortes tempêtes (> 118 km/h) associées à la pleine mer – autrement dit des événements à fort potentiel de submersion littorale – sont rares (Costa *et al.*, 2004 ; Fichaut et Suanez, 2008). Ce type d'événement ne s'est produit qu'une dizaine de fois en 27 ans sur les neuf stations étudiées, dans le cas d'un coefficient de marée supérieur à 100. L'hétérogénéité spatiale des marées de tempête a également été mise en valeur. Une tempête de 140 km/h sachant que la

mer est haute a un temps de retour 35 fois plus élevé à Brest qu'à La Rochelle. La considération de l'ensemble de la façade atlantique permet donc de compléter les études réalisées jusque là sur l'évolution des marées de tempête, dans la mesure où ces travaux concernaient principalement les littoraux de la Bretagne et de la Manche, c'est-à-dire des sites particulièrement propices à l'aléa (Caspar, 1990 ; Bouligand et Pirazzoli, 1999 ; Costa *et al.*, 2004 ; Pirazzoli *et al.*, 2006 ; Caspar *et al.*, 2007 ; Pouvreau, 2008).

Si l'estimation de temps de retour d'une tempête associée à la pleine mer a été possible, il est plus délicat de caractériser des évolutions ou de proposer des analyses prospectives, d'une part parce que les événements extrêmes sont rares, et d'autre part dans la mesure où la conjonction des deux phénomènes est due au hasard. Néanmoins, certains auteurs ont constaté une variabilité des niveaux d'eau extrêmes organisée selon des cycles variant de 10 à 16 ans et expliquée par des changements de tendance des vents d'afflux (Bouligand et Pirazzoli, 1999 ; Pirazzoli, 2000 ; Pirazzoli *et al.*, 2004 ; Costa *et al.*, 2004 ; Fichaut et Suanez, 2008). La période 1970-1990 fut à ce titre riche en événements extrêmes. Selon Pirazzoli *et al.* (2004), ces changements cycliques pourraient être conditionnés par le déplacement des grands centres d'action, et plus précisément par l'alternance subdécennale des phases négatives et positives de l'indice d'oscillation nord atlantique (ONA). Selon Betts *et al.*

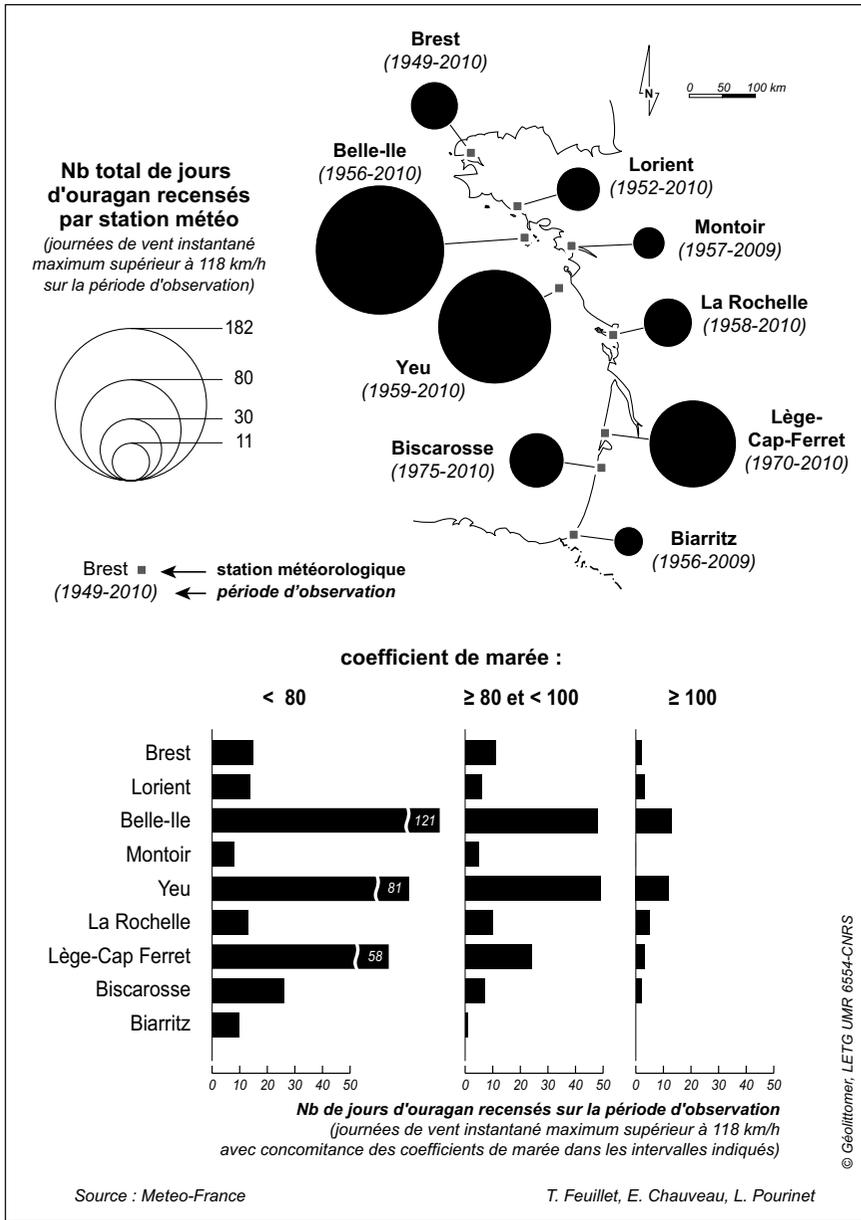


Figure 2 : Jours d'ouragan observés et concomitance avec des marées de forts coefficients

Hurricane days observed and concomitantly with strong tidal coefficients

(2004), la variable la plus discriminante en termes de surcotes dans le nord-ouest de la France et le sud-est de l'Angleterre n'est pas l'ONA, mais le gradient de température de surface transatlantique, en particulier durant le mois d'occurrence de la tempête. Par ailleurs, Costa *et al.* (2004) notent qu'au facteur météorologique s'est ajouté le phénomène astronomique de déclinaison lunaire (qui a culminé au milieu des 1980) et qui, selon les auteurs, « a augmenté statistiquement la chance d'observer la conjonction d'une pleine mer de vive-eau et d'un fort vent d'afflux ». Finalement, toutes ces incer-

titudes rendent délicates la prévision précise des submersions de tempêtes le long de nos littoraux.

Les particularités de Xynthia

Dans le cas de Xynthia, outre le fait que le drame est prioritairement dû à des conditions d'urbanisation à haut risque (Anziani, 2010 ; Chauveau *et al.*, 2011), le retour d'expérience partiellement alimenté par les rapports parlementaires pointe des défaillances en ce qui concerne la connaissance, et donc la gestion des submersions marines en France.

	Situations caractérisées par des vents instantanés (VMI) > ou = à 118,8 km/h, des coefficients de marée > ou = à 80, et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures	Nombre de situations par an de VMI > ou = à 118,8 km/h, associés coefficients de marée > ou = à 80, et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures	Situations caractérisées par des vents instantanés (VMI) > ou = à 118,8 km/h, des coefficients de marée > ou = à 100, et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures	Nombre de situations par an de VMI > ou = à 118,8 km/h, associés à des coefficients de marée > ou = à 100, et une différence horaire entre vent maximum et pleine mer inférieure ou égale à trois heures
Brest (1984-2010)	2	0,07	1 (1984)	0,04
Belle-Île (1984-2010)	18	0,67	4 (1984; 1994; 1999; 2009)	0,15
Lorient (1984-2010)	1	0,04	0	-
Montoir (1984-2009)	1	0,04	0	-
Yeu (1984-2010)	13	0,48	3 (1984; 1987; 2008)	0,11
La Rochelle (1984-2010)	3	0,11	1 (2010)	0,04
Cap Ferret (1984-2010)	7	0,26	1 (1997)	0,04
Biscarosse (1984-2010)	4	0,15	0	-
Biarritz (1984-2009)	1	0,04	0	-

Tableau 5 : Analyse fréquentielle des événements de vent supérieur à 118,8 km/h associés à un coefficient de marée supérieur ou égal à 80 et 100 et à la pleine mer sur les neuf stations de la façade atlantique française

Frequency analysis of wind events upper than 118,8 km/h associated with tide coefficient upper than 80 and 100 and occurring during high-tide on the nine stations of the French Atlantic coast

Néanmoins, la connaissance des sites français fortement exposés aux surcotes a progressé suite aux grandes tempêtes de la mi-octobre 1987 et de la fin décembre 1999, ainsi qu'à celle du 10 mars 2008, qui s'était produite lors d'un coefficient de marée de 106 (Cariolet *et al.*, 2010). En s'appuyant sur deux de ces trois épisodes, Météo-France (2001) a publié des cartes des sites potentiellement exposés, dont les surcotes peuvent dépasser 150 centimètres (1,53 m à La Rochelle lors de l'épisode *Xynthia* pour rappel). D'après les documents consultés, les côtes de la Manche sont très largement concernées de la Baie de Somme à la Baie de Seine, ainsi que dans l'ouest du Cotentin. Sur la façade atlantique, huit secteurs ont été répertoriés : les rades de Brest et de Douarnenez, la baie de Quiberon, l'estuaire de la Loire et la baie de Bourgneuf, les pertuis bretons et charentais, et l'estuaire de la Gironde.

Précisons qu'il y lieu de dissocier les phénomènes de surcotes des risques de submersion, dans la mesure où les pics de surcotes peuvent survenir en période de basse mer, et/ou lors des marées à coefficient faible ou moyen. D'après Nicolle (2006), les surcotes mesurées lors de l'épisode tempétueux de fin décembre 1999 ont atteint dans les pertuis charentais le 27 au soir des niveaux supérieurs à ceux de

Xynthia : 1,5 m à La Rochelle, 1,80 m à Rochefort et à Royan, et 2 m à La Palus, face à l'île d'Oléron. Si les conséquences n'ont pas été aussi dramatiques que lors de *Xynthia*, c'est probablement en raison d'une diminution des coefficients de marée, passés de 106 le 24 au matin à 77 le 27 au soir (www.shom.fr).

La tempête du 10 mars 2008 a été à l'origine d'un numéro spécial de la revue *Noroi* (2010/2) composé de sept contributions. L'intérêt pour nous d'y faire présentement allusion est double. Premièrement, ce numéro porte précisément sur les impacts morphogéniques des tempêtes, mais les références omniprésentes aux surcotes et submersions permettent de faire le point sur les avancées méthodologiques en la matière. Deuxièmement, la tempête du 10 mars, baptisée *Johanna*, présente des caractéristiques météorologiques proches de *Xynthia*, associant le passage d'une tempête de forte intensité à une marée de vive-eau (coefficient de 106 pour la tempête *Johanna*). À partir de ces différentes contributions, nous avons choisi de tenter des parallèles sur les points suivants : (1) la trajectoire de la tempête *Xynthia* et direction des vents, (2) le rôle des facteurs morpho-sédimentaires dans l'occurrence des submersions, (3) l'influence des éléments topo-bathymétriques entrant dans la composition de la surcote.

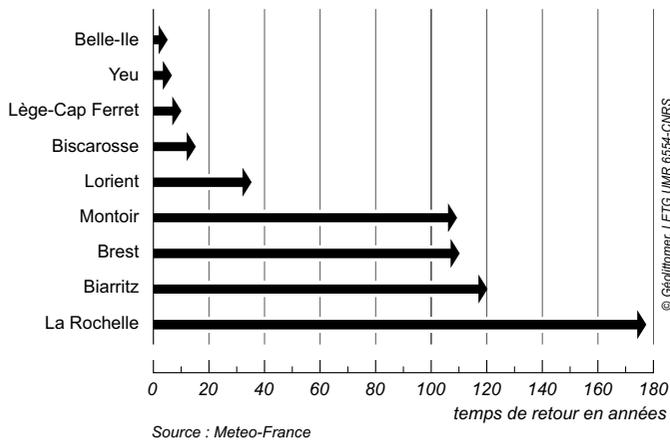


Figure 3 : Temps de retour d'une tempête de 140 km/h sachant que la mer est haute, établis à partir de la période 1984-2010

Return period of a 140 km/h storm event, knowing that high-tide occurs, on the 1984-2010 period

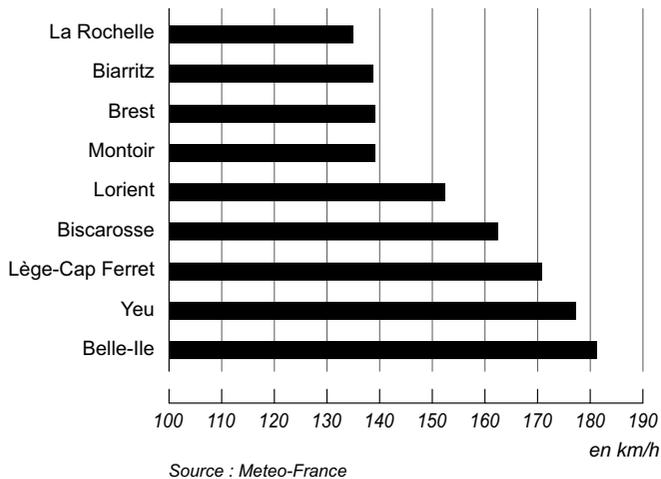


Figure 4 : Valeur en km/h de la tempête centennale sachant que la mer est haute, établis à partir de la période 1984-2010

Value in km/h of the centennial storm event, knowing that high-tide occurs, on the 1984-2010 period

(1) la trajectoire de *Xynthia* est un élément qui la différencie très sensiblement de la tempête du 8 mars 2010, ainsi que de la majorité des tempêtes sur l'ensemble de la façade atlantique française. Pour rappel, celle-ci était franchement sud ouest-nord est. *Xynthia* a donc abordé les côtes charentaise et vendéenne à la perpendiculaire, avant de poursuivre sa route à l'intérieur des terres, en direction de la région parisienne, puis de la frontière franco-belge au niveau des Ardennes. De ce fait, et bien que la Bretagne et quelques localités normandes aient été affectées par des inondations, le linéaire côtier directement affecté par des inondations

conséquentes a été sensiblement moins important qu'en mars 2008, puisqu'à cette occasion, la trajectoire de la dépression était ouest, affectant successivement les littoraux de Bretagne sud et nord, de Basse puis de Haute Normandie, et de Picardie. Par ailleurs, les submersions ne se sont produites lors de *Xynthia* qu'à l'occasion d'un seul cycle de marée, contre deux pour la tempête *Johanna*. En ce qui concerne la direction des vents, au niveau du secteur le plus durement touché, aux confins des littoraux de Vendée et de Charente maritime, celle-ci est passée du secteur sud (à une heure du matin) à ouest (4 heures du matin). Dans ces conditions, les vents d'afflux ont trouvé les conditions les plus propices à la formation des surcotes d'origine *wind set up*, et éventuellement *wave set up* (cf. *supra*).

(2) l'article de Suanez et Cariolet (2010), se référant par ailleurs à de nombreux travaux de recherche, insiste sur l'état du stock sédimentaire (plage et pied de dune) avant la tempête. Dans ce sens, un hiver marqué par des tempêtes fréquentes augmentera le risque de submersion à mesure que l'on avance dans la saison et que ce stock aura diminué. Pour ce qui concerne *Xynthia*, ce facteur n'a pas joué : l'hiver 2009-2010 a été marqué par des conditions peu agitées (à l'exception de la deuxième quinzaine de novembre, mais qui a surtout affecté des régions plus septentrionales). Du reste, les cordons dunaires entre les estuaires de la Loire et de la Gironde n'ont pas été franchis, à quelques très rares exceptions près, ce qui n'a pas empêché leur recul massif (3 à 5 m en moyenne, jusqu'à 22 m très localement). Les submersions les plus étendues ont eu lieu sur le polder de l'anse de l'Aiguillon, par franchissement des ouvrages de protection pour l'essentiel.

(3) les principaux paramètres à prendre en compte dans la survenue des surcotes, outre la force et la direction des vents, la pression atmosphérique et le coefficient de marée, sont le *wind setup*, surcote provoquée par la contrainte exercée par le vent à la surface de la mer, le *wave setup*, correspondant à l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côté liée à la dissipation d'énergie due au déferlement des vagues arrivant à la côte, le *wave uprush* (hauteur du jet de rive) et éventuellement les seiches côtières. Les seiches côtières sont des oscillations stationnaires générées par des perturbations comme les vagues piégées dans des zones plus ou moins confinées (fonds de baies, estuaires, détroits, notamment).



Wave setup et wave uprush sont sous la dépendance des caractéristiques de la houle, et de ses déformations à la côte fonction de la bathymétrie d'avant plage. Suanez *et al.* (2007) ont pu déterminer la période de retour et les hauteurs associées du *wave setup* pour une plage de Bretagne nord. Pour une période de retour de 2 ans, la hauteur calculée est de 43 cm, et pour 100 ans, elle est de 80 cm, ce qui est considérable. Dans le cas des côtes du sud Vendée et de Charente-Maritime, la bathymétrie pré-littorale est caractérisée par l'extension très importante des faibles profondeurs loin en avant du trait de côté, ce qui génère des phénomènes très puissants d'amortissement de la houle, même en cas d'élévation exceptionnelle du plan d'eau. Ceci nous amène à penser que le *wave setup* n'a pas joué le rôle principal qui est habituellement le sien dans la formation de la surcote, dans ce secteur. En revanche, plus à l'est, à partir de la commune de La Tranche-sur-Mer, où on a pu relever des reculs importants du cordon dunaire, ou encore sur la côte nord et ouest de l'île d'Yeu, la bathymétrie est plus favorable à l'augmentation de la hauteur d'eau attribuée au *wave setup*. Pour les mêmes raisons, nous pensons que l'importance des surcotes et des submersions résultantes sur les secteurs du sud de la Vendée, de Charente-Maritime, ou encore de la baie de Bourgneuf relèvent probablement davantage des effets du *wind setup*. Par ailleurs, il ne faut peut-être pas exclure l'existence de phénomènes de seiches.

Au final, si les valeurs des surcotes extrêmes mesurées lors de ces deux épisodes sont assez proches (1,41 m à Saint Malo en mars 2008, 1,53 m à La Rochelle en février 2010, en site portuaire par conséquent, et au moment de la haute mer de vive-eau), le bilan humain n'a rien à voir : alors qu'on ne déplore pas de victimes lors de la tempête *Johanna*, le bilan humain de *Xynthia* restera tristement célèbre (47 décès en France, dont 29 sur la seule commune de la Faute-sur-mer). Ces constats nous amènent à souhaiter que la modélisation des surcotes dues aux tempêtes se développe afin de contribuer à cerner la part de ces différents facteurs, mais elle est inopérante actuellement (Nicolle, 2006 ; Perhérin, 2007). Ce qui ressort des conclusions de la seconde référence, c'est que « les paramètres à prendre en compte pour la prévision des surcotes sont spécifiques à chaque secteur », et que « seule une instrumentation suffisamment longue

du site peut permettre de déterminer l'ensemble des paramètres » (Perhérin, 2007). Toutefois, le relief détaillé des régions côtières soumises au risque de submersion va justement entrer dans une phase de prospection accrue avec la cartographie par Lidar (*Light Detection And Ranging*), qui va permettre de dresser des cartes altimétriques et bathymétriques (pour les petits fonds) de grande précision (environ 10 cm). Ce gain majeur de précision est très attendu de la part des gestionnaires des territoires littoraux exposés.

Enfin, la connaissance des épisodes plus ou moins dramatiques de submersions côtières est enrichie par les investigations historiques spécifiquement consacrées à cet objet de recherche. Sur le littoral saintongeais, Garnier et Surville (2010) ont assuré la coordination de l'ouvrage *La tempête Xynthia face à l'histoire*, qui fait le point sur les épisodes de submersions (appelés « vimers » localement) notamment en région Poitou-Charente, depuis le XVI^e siècle. L'un des résultats présentés montre clairement que le demi-siècle 1950-1999 et celui en cours, (2000-2049) ne totalisent chacun qu'un épisode, contre sept pour le demi-siècle qui a précédé (1900-1949). Ce fait constitue, selon les auteurs, l'un des facteurs ayant contribué à l'oubli du risque sur les sites touchés par *Xynthia*.

Les prolongements statistiques envisageables

Les temps de retour des tempêtes associées aux pleines mers ont ici été estimés à l'aide de probabilités conditionnelles. Une perspective intéressante consisterait à réitérer les analyses par le biais d'une approche probabiliste marginale, c'est-à-dire en considérant les aléas (tempête, heure de la marée, coefficient de marée) séparément. Cette analyse s'appuierait sur l'étude de la loi conjointe entre les variables, dont l'efficacité dans des domaines appliqués de la climatologie ou de l'hydrologie a déjà été prouvée (Pirazzoli et Tomasin, 2007 ; Tomasin et Pirazzoli, 2008 ; Renard et Lang, 2007).

Outre cette perspective, l'examen des directions de vent constitue bien entendu un paramètre essentiel, susceptible de moduler les valeurs de surcotes en fonction de l'orientation du trait de côte (Pirazzoli, 2000 ; Cariolet, 2010). De ce point de vue, des traitements statistiques sont envisageables,

et pourraient faire l'objet de développements spécifiques sur chacun des secteurs étudiés, en y associant les paramètres déjà traités. Il convient également de noter que le traitement statistique développé ici ne tient compte que du vent maximal quotidien, et a donc tendance à sous-estimer le nombre d'événements potentiels de surcotes, dans la mesure où plusieurs événements peuvent avoir lieu dans la même journée. Le traitement des séries horaires de vent apporterait en cela des précisions non négligeables sur la fréquence et la durée des phénomènes combinés susceptibles de provoquer des submersions marines.

Par ailleurs, les risques de submersion sur les sites exposés dépendent dans certains cas des écoulements continentaux au débouché des fleuves, bloqués par la surcote marine et susceptibles d'aggraver le phénomène. Rappelons à ce sujet que lors de l'épisode *Xynthia*, les précipitations précédant et accompagnant la dépression ont été particulièrement faibles, générant des débits eux-mêmes très peu conséquents au débouché des fleuves où les surcotes ont été les plus fortes (Lay, Sèvre niortaise, Charente). Ce paramètre a donc joué dans le sens d'une atténuation de la catastrophe (Chauveau *et al.*, 2011). La connaissance des débits fluviaux devrait donc logiquement être intégrée dans une exploitation statistique des marées de tempêtes, ce qui est aisé de prime abord, mais pose de réelles difficultés lorsqu'il s'agit d'apprécier la part des apports continentaux dans la formation et l'évolution de la surcote.

Enfin, la prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer et de ses variations locales, actuelles et à venir, doit naturellement être envisagée dans la perspective d'une exploitation de ces recherches à des fins opérationnelles. Actuellement, nombreux sont les travaux scientifiques qui intègrent cette variable en sciences de la terre, en géomorphologie littorale ou en climatologie (Durand et Heurtefeux, 2006 ; Suanez *et al.*, 2007 ; Ullmann et Moron, 2008 ; Brunel et Sabatier., 2009 ; Cariolet et Suanez, 2009 ; Cariolet, 2010).

CONCLUSION

L'approche statistique privilégiée ici dans le repérage des fréquences et des temps de retour des marées de tempêtes à l'échelle semi-séculaire apporte

des éclairages complémentaires dans l'analyse des surcotes et des submersions littorales potentiellement associées. La question de la périodicité d'un événement tel que *Xynthia* n'est pas véritablement tranchée à l'issue de cette investigation, mais plusieurs conclusions sont néanmoins tirées. (1) Sur les séries complètes (variant de 35 à 61 ans), les tempêtes (vent maximum quotidien supérieur à 89 km/h) ont eu tendance à augmenter dans quatre des stations étudiées, quatre autres présentent des séries aléatoires (pas de tendance) et une dernière indique une tendance négative. Sur la période homogénéisée 1970-2010, seules deux stations présentent une tendance positive, les autres étant aléatoires. On en conclut finalement qu'il est difficile de distinguer une règle générale concernant l'évolution des tempêtes sur la façade atlantique depuis les 40 dernières années. (2) En termes de fréquence, des événements comparables à *Xynthia* – c'est-à-dire associant des tempêtes violentes (> 118 km/h), un coefficient de marée supérieur à 100 et la pleine mer (plus ou moins trois heures de la marée haute) – ne se sont produits qu'une dizaine de fois durant les 27 dernières années, en tenant compte de l'ensemble des neuf stations. On peut donc qualifier de rare ce type de conjoncture, qui n'a en outre presque exclusivement lieu que sur les sites particulièrement exposés (îles, caps). En cela, un tel événement est beaucoup plus rare à La Rochelle qu'à Belle-Île, et peut très logiquement expliquer une appréciation différente du risque de surcote par les populations locales. (3) En termes de temps de retour des marées de tempête conditionnelles (tempête ayant lieu sachant que la mer est haute), les résultats varient fortement et logiquement en fonction des stations. C'est justement à La Rochelle, proche du lieu où *Xynthia* a fait tant de victimes, que le temps de retour d'une marée de tempête de 140 km/h est le plus élevé (environ 180 ans, contre seulement 5 ans pour les îles – Belle-Île et île d'Yeu), ce qui confirme le caractère rare d'un tel phénomène dans cette région. Enfin, les valeurs de la marée de tempête centennale varient de 180 km/h à Belle-Île à environ 135 km/h à La Rochelle. Finalement, des phénomènes météo-marins semblables à *Xynthia* ne peuvent pas être considérés comme exceptionnels dans nombre de sites de la façade atlantique. Le caractère exceptionnel de *Xynthia* relève davantage du nombre de ses victimes (vulnérabilité) que de l'événement météo-marin (aléa).



Cette étude, bien qu'apportant des éléments nouveaux sur l'analyse fréquentielle des forçages météo-marins sur la façade atlantique française, doit pouvoir être complétée dans de futurs travaux. Notre volonté est notamment de la prolonger en y intégrant les résultats de campagnes de mesures de précision et de modélisation des niveaux marins, dont le développement semble désormais faire l'objet d'une priorisation des politiques publiques.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Yves Le Lann (Météo France) pour la transmission des données et des métadonnées météorologiques. Merci également à Michel Lang pour ses remarques relatives aux temps de retour des marées de tempête, ainsi qu'à Denis Mercier, à Serge Suanez et aux deux relecteurs anonymes pour leurs conseils avisés sur la première version du manuscrit.

Bibliographie

- ANCEY C., 2006. *Dynamique des avalanches*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Anthony, 338 p.
- ANZIANI A., (dir.), 2010. *Rapport d'information sur les conséquences de la tempête Xynthia*, n° 554, 10 juin, Sénat, Paris, 100 p.
- BEAULIEU C., OUARDA T., SEIDOU O., 2007. Synthèse des techniques d'homogénéisation des séries climatiques et analyse d'applicabilité aux séries de précipitations, *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, n° 1, p. 18-37.
- BERNIER N. B., THOMPSON K. R., 2007. Tide-surge interaction off the east coast of Canada and northeastern United States, *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, p. 1-12.
- BESSEMOULIN P., 2002. Les tempêtes en France, *Annales des Mines*, p. 9-14.
- BETTS N. L., ORFORD J. D., WHITE D., GRAHAM C. J., 2004. Storminess and surge in the South-Western Approaches of the eastern North Atlantic: the synoptic climatology of recent extreme coastal storms, *Marine Geology*, vol. 210, n° 1-4, p. 227-246.
- BOULIGAND R., PIRAZZOLI P.A., 1999. Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution, *Oceanologica Acta*, vol. 22, n° 2, p. 153-166.
- BRUNEL C., SABATIER F., 2009. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for the French Mediterranean Coast, *Geomorphology*, vol. 107, n° 1-2, p. 57-74.
- BUISHAND, T. A., 1984. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 73, n° 1-2, p. 51-69.
- CARIOLET J.-M., 2010. Use of high water marks and eyewitness accounts to delineate flooded coastal areas: the case of Storm Johanna (10 March 2008) in Brittany, France, *Ocean and Coastal Management*, vol. 53, n° 11, p. 679-690.
- CARIOLET J.-M., SUANEZ S., 2009. Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses, *La Houille Blanche*, n° 2, p. 52-58.
- CARIOLET J.-M., COSTA S., CASPAR R., ARDHUIN F., MAGNE R., GOASGUEN G., 2010. Aspects météo-marins de la tempête du 10 mars 2008 en Atlantique et en Manche, *Norois*, n° 215, p. 11-31.
- CASPAR R., 1990. Marée de tempête dans le nord-ouest de la France, *Neptunia*, Amis des musées de la Marine, Paris, n° 178, p. 8-15.
- CASPAR R., COSTA S., JAKOB E., 2007. Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France ; le cas des inondations par la mer entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme, *La Météorologie*, n° 57, p. 37-47.
- CASPAR R., COSTA S., LEBRETON P., LETORTU P., 2010. Les submersions de tempête de la nuit du 10 au 11 mars 2008 sur la côte d'Albâtre (Haute-Normandie, France) : détermination météo-marine, *Norois*, n° 215, p. 115-132.
- CHAUVEAU E., CHADENAS C., COMENTALE B., POTTIER P., BLANLOEIL B., FEUILLET T., MERCIER D., POURINET L., ROLLO N., TILLIER I., TROUILLET B., 2011. Xynthia, premières leçons d'une catastrophe, *Cybergeo*, n° 538, [<http://cybergeo.revues.org/23763>].
- CHOI B. H., EUM H. M., WOO S. B., 2003. A synchronously coupled tide-wave-surge model of the Yellow Sea. *Coastal Engineering*, vol. 47, n° 4, p. 381-398.
- COSTA S., CANTAT O., PIRAZZOLI P. A., LEMAITRE M., DELAHAYE D., 2004. *Vents forts et submersions de tempête en Manche Orientale : analyse météo-marine sur la période historique récente*, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat, mémoire du temps. Les relations climat-espace-société », Caen, p. 277-280.
- COX D. R., 1965. *Renewal Theory*, Methuen & Co, London, 186 p.
- DANIEL P., JOSSE P., ULVOAS V., 2001. Atmospheric forcing impact study in Météo-France storm surge model, *Coastal Engineering V, Computer modelling of seas and coastal regions*, WIT Press, p. 135-144.
- DREVETON C., 2002. Évolution du nombre de tempêtes observées en France, *La Météorologie*, vol. 37, p. 46-56.
- DURAND P., HEURTEFEUX H., 2006. Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation. Exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France), *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, vol. 50, n° 2, p. 221-244.
- FICHAUT B., SUANEZ S., 2008. Les blocs cyclopéens de l'île de Banneg (archipel de Molène, Finistère) : accumulations supratidales de forte énergie, *Geomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, n° 1, p. 15-32.
- GARNIER E., SURVILLE F., 2010. *La tempête Xynthia face à l'histoire*. Le Croît vif, Saintes, 174 p.

- HALLÉGOUËT B., HÉNAFF A., 2006. *Évolution récente et gestion des espaces littoraux de l'ouest Cornouaille*, Les Actes des rencontres de l'ouest Cornouaille « Quelles pistes de développement pour le territoire ? », mai-juin 2005, Association Ouest Cornouaille Promotion (AOCP), Pont-L'Abbé, p. 20-34.
- HONTARRÈDE M., GALLI F.-L., 2001. Surcote et marée de tempête, *Met Mar*, n° 190, p. 15-17.
- HORSBURGH K. J., WILSON C., 2007. Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea, *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, C08003, p. 1-13.
- KENDALL M. G., 1938. A new measure of rank correlation, *Biometrika*, vol. 30, n° 1-2, p. 81-93.
- LANG M., RASMUSSEN P., OBERLIN G., BOBÉE B., 1997. Échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement, *Revue des Sciences de l'eau*, vol. 10, n° 3, p. 279-320.
- LOWE J. A., GREGORY J. M., FLATHER R. A., 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Climate Dynamics*, vol. 18, n° 3-4, p. 179-188.
- MANN H. B., 1945. Non parametric test against trend, *Econometrika*, vol. 13, n° 3, p. 245-259.
- MESTRE O., 2000. *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*. Thèse de doctorat, Toulouse, Université Paul-Sabatier, 225 p.
- NICOLLE A., 2006. *Modélisation des marées et des surcotes dans le Pertuis Charentais*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 307 p.
- PERHERIN C., 2007. *Contribution à l'analyse des phénomènes de surcotes et de submersions marines. Secteur du Pertuis Breton (Vendée)*, TFE, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 94 p.
- PETIT A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.
- PIRAZZOLI P. A., 2000. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France, *Oceanologica Acta*, vol. 23, n° 6, p. 643-661.
- PIRAZZOLI P. A., REGNAULD H., LEMASSON L., 2004. Change in storminess and surges in western France during the last century, *Marine Geology*, vol. 210, n° 1-4, p. 307-323.
- PIRAZZOLI P. A., COSTA S., DORNBUSH U., TOMASIN A., 2006. Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel, *Ocean Dynamics*, vol. 56, n° 5-6, p. 498-512.
- PIRAZZOLI P. A., TOMASIN A., 2007. Estimation of return periods for extreme sea levels: a simplified empirical correction of the joint probabilities method with examples from the French Atlantic coast and three ports in the southwest of the UK, *Ocean Dynamics*, vol. 57, n° 2, p. 91-107.
- POUVREAU N., 2008. *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 468 p.
- PRANDLE D., WOLF J., 1978. The interaction of surge and tide in the North Sea and River Thames, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, vol. 55, p. 203-216.
- PYE K., BLOTT S. J., 2008. Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: an investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK, *Geomorphology*, vol. 102, n° 3-4, p. 652-666.
- RENARD B., LANG M., 2007. Use of a Gaussian copula for multivariate extreme value analysis: Some case studies in hydrology, *Advances in Water Resources*, vol. 30, n° 4, p. 897-912.
- ROSSITER J. R., 1961. Interaction between tide and surge in the Thames, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, vol. 6, p. 29-53.
- SIMON B., 1994. *Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France*, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Rapport d'étude n° 001/94, 78 p.
- SUANEZ S., CARIOLET J.-M., 2010. L'action des tempêtes sur l'érosion des dunes : les enseignements de la tempête du 10 mars 2008, *Norois*, n° 215, p. 77-99.
- SUANEZ S., FICHAUT B., SPARFEL L., 2007. Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquées à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne), *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, n° 4, p. 319-334.
- TOMASIN A., PIRAZZOLI P. A., 2008. Extreme sea levels in the English Channel: calibration of the joint probability method, *Journal of Coastal Research*, vol. 24, 4C, p. 1-13.
- ULLMANN A., PIRAZZOLI P. A., 2007. Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion, *Cybergeo*, n° 362, [<http://cybergeo.revues.org/1708>].
- ULLMANN A., MORON V., 2008. Weather regimes and sea surges variations over the Gulf of Lions (French Mediterranean coast) during the 20th century, *International Journal of Climatology*, vol. 28, n° 2, p. 159-171.
- WÖPPELMANN G., POUVREAU N., COULOMB A., SIMON B., WOODWORTH P.L., 2008. Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record, *Geophysical Research Letters*, vol. 35, L22605.
- WOLF J., 2009. Coastal flooding: impacts of coupled wave-surge-tide models, *Natural Hazards*, vol. 49, n° 2, p. 241-260.

