

VAGUES SCÉLÉRATES : QUELLES PRÉOCCUPATIONS POUR L'INGÉNIEUR ?

Michel OLAGNON

Ifremer – Centre de Brest – Plouzané (France)

SOMMAIRE

L'ingénieur ou l'architecte naval peuvent légitimement s'inquiéter de savoir si les vagues scélérites, d'une sévérité inattendue, sont correctement prises en considération dans les pratiques et les règles de dimensionnement.

On décrit ici les connaissances obtenues sur ce phénomène, principalement au cours de la décennie écoulée, par l'analyse des mesures *in situ*, la recherche théorique et l'expérimentation en bassin.

Il apparaît que les méthodes de dimensionnement conventionnelles ne sont pas prises en défaut aux niveaux de fiabilité, et donc de rareté, qui sont actuellement exigés .

Les vagues scélérites n'en demeurent pas moins un danger pour les opérations et le travail à la mer. Les mécanismes avancés pour en expliquer l'apparition n'ont pu pour le moment être ni validés, ni invalidés en conditions réelles, et il n'est toujours pas possible de quantifier un éventuel accroissement du risque de leur apparition en fonction de conditions particulières.

SUMMARY

Designers and naval architects can legitimately feel concerned as to whether freak waves, of unexpected severity, are correctly accounted for in current design practices and regulations.

We describe here the main findings related to that phenomenon, achieved mainly during the last decade by analysis of field data, theoretical developments and wave flume experiments.

It appears that conventional design methods are not actually challenged given the reliability levels required at present.

Nevertheless, freak or rogue waves remain a danger for operations and work at sea. The hypotheses for their generating mechanisms have still not been validated in actual seas, and it is thus not possible to forecast either precisely any increase in their risk of occurrence as a function of the prevailing conditions.

1. INTRODUCTION

Une vague est qualifiée de scélérite lorsque sa sévérité surpasse ce qu'on est en droit d'en attendre à l'examen des caractéristiques de l'état de mer qui prévaut au moment de son occurrence. Pour l'ingénieur se pose naturellement la question de savoir si

l'existence de telles vagues doit remettre en cause les règles de dimensionnement des navires et des ouvrages en mer qui n'atteindraient plus, vis-à-vis d'elles, les niveaux de fiabilité requis.

Nous nous efforcerons dans une première partie de préciser ce qu'on nomme sévérité inattendue.

Nombre d'auteurs se fondent uniquement sur le dépassement d'un critère de hauteur, généralement fixé à deux fois la hauteur significative. Nous examinerons ici le problème sous l'angle des caractéristiques de la vague susceptibles de conduire à des conséquences sur un navire ou une structure, et qui ne se limitent pas à sa seule hauteur. Cambrure, asymétrie, déferlement font que deux vagues de hauteurs voisines peuvent avoir des effets drastiquement différents.

D'autre part, les vagues sont un phénomène aléatoire à grand nombre d'occurrences, et un seuil déterministe ne peut représenter une séparation adéquate entre deux catégories.

Les études portent donc sur la possibilité que co-existent deux populations statistiques.

L'une serait constituée de vagues "ordinaires", correctement modélisées par les théories de houle classique et donc correctement prises en compte par les règles conventionnelles de dimensionnement, dont on observerait parfois les extrêmes.

L'autre consisterait en vagues relevant d'autres phénomènes générateurs que ceux qui interviennent suivant les théories classiques, phénomènes qui ne se produiraient que rarement et dont les vagues scélérates seraient simplement des représentants typiques.

Nous présenterons dans une deuxième partie des résultats d'études statistiques, qui ne permettent jusqu'à présent pas de conclure à l'existence de cette seconde catégorie dans la nature en nombres suffisants pour que les règles de construction, étant donnés les niveaux de leurs objectifs de fiabilité, doivent en être affectées.

Une approche très prisée consiste à reconstituer, numériquement selon les principes de la mécanique ondulatoire non-linéaire ainsi qu'en bassin (Onorato et al, [22]) par un contrôle complet des conditions initiales, des vagues extrêmes par rapport à l'état de mer où elles surviennent.

Ces travaux, souvent de haute tenue, permettent de synthétiser des vagues d'une hauteur extrême par rapport à celle de leurs voisines. Nous montrerons dans une troisième partie que tout cohérents qu'ils soient, les critères qu'ils mettent en évidence pour

l'apparition de vagues scélérates sont des détecteurs dénués de capacité prédictive.

Il n'est en fait possible de vérifier ni que les conditions théoriques d'apparition sont effectivement réunies dans la nature, ni avec quelle fréquence d'occurrence elles pourraient l'être, ni que d'autres phénomènes inhibiteurs ne sont pas à l'œuvre : déferlement, directionnalité, etc.

Nous évoquerons dans la dernière partie les efforts de prévision météorologique de zones et de périodes à risques, efforts efficaces lorsque les vagues relèvent de situations simples comme vagues contre courant, et peu concluants sinon.

2. CRITÈRES CARACTÉRISTIQUES

Il est indéniable que des vagues se produisent dont la sévérité dépasse les attentes de ceux qui y sont confrontés au vu des conditions de mer qui prévalaient avant leur occurrence. Pour pouvoir étudier ces vagues, il faut toutefois définir plus rigoureusement les critères qui permettront de décider qu'une vague sort de l'ordinaire, où l'ordinaire correspond à la combinaison des statistiques à long terme des états de mer et des théories conventionnelles décrivant la forme et la cinématique des plus grandes vagues d'un état de mer.

2.1. Rapport à la hauteur significative

De nombreux auteurs définissent les vagues anormales comme celles dont la hauteur crête-croix dépasse 2 fois la hauteur significative, ou dont la hauteur de la crête au-dessus du niveau moyen dépasse 1.25 fois la hauteur significative, ou éventuellement avec d'autres rapports approchants.

Ces critères, s'ils répondent bien à la notion de comparaison aux vagues voisines, présentent deux gros défauts. D'une part, ils assimilent la sévérité de la vague à sa seule hauteur. Or les travaux de Kjeldsen [1], notamment, ont montré le rôle majeur que d'autres caractéristiques comme la cambrure et la dissymétrie ont pu avoir dans certains accidents de mer. D'autre part, la normalité, c'est-à-dire l'appartenance de l'élévation de la surface libre à la famille des processus

gaussiens, se traduit par le fait que les hauteurs crête-creux suivent une loi de Rayleigh .

Si l'on considère le maximum observé sur 180 vagues, soit environ vingt minutes en moyenne en mer du Nord (Robin & Olagnon 1991, [2]), le rapport H_{\max}/H_s de la durée observée vaut en moyenne 1.63, il vaut 1.86 dans un cas sur 9 (3 heures), et 2 dans un cas sur 21 (7 heures). Avec la définition découlant d'un rapport 2, on

aurait donc ce paradoxe d'observer, suivant le modèle normal, plus de trois vagues anormales par jour ! Relever le seuil ne supprime évidemment pas le paradoxe : le critère sélectionne un grand nombre de vagues parfaitement normales, donc a priori correctement prises en compte dans les procédures et règles de dimensionnement, il n'est pas suffisamment discriminant.

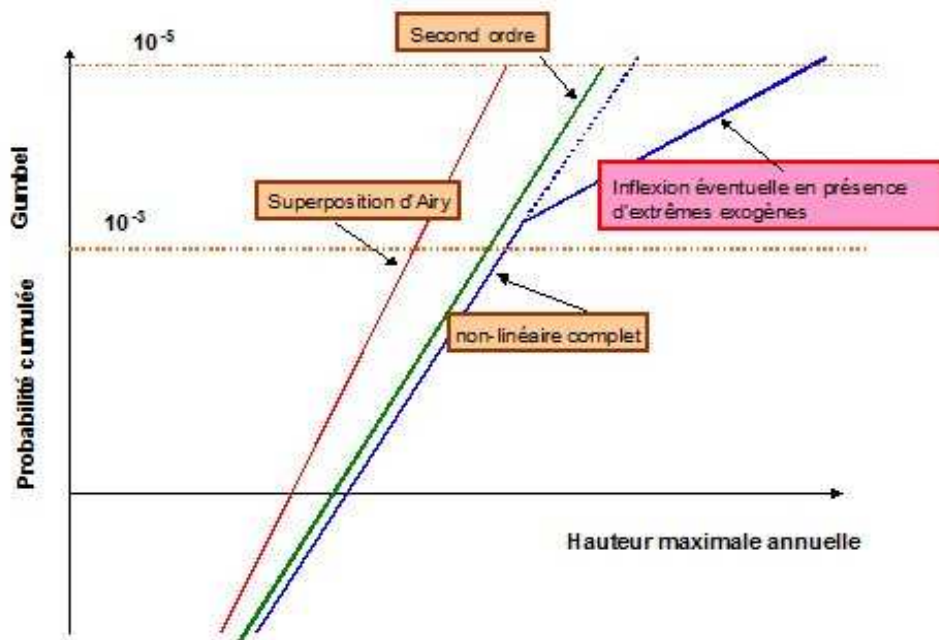


Figure 1: Principe de la déviation anormale d'après Haver [3]

2.2. Discrimination statistique

Suite aux considérations qui précèdent, il paraît plus adéquat de définir la normalité par rapport aux méthodes conventionnelles de détermination des vagues utilisées dans les procédures de dimensionnement, lesquelles prennent en compte les interactions vague-vague au second ordre. La figure 1 représente en coordonnées de Gumbel les probabilités de dépassement qu'on est censé observer pour les vagues, suivant les simplifications auxquelles on procède par rapport au cas pleinement non-linéaire (pointillé bleu). Si les phénomènes en

jeu et les populations statistiques sont les mêmes en conditions extrêmes et sub-extrêmes, les probabilités de dépassement apparaîtront, d'après la théorie des extrêmes, comme des droites dans ce système de coordonnées. Par contre, si des phénomènes ne se manifestent que dans les conditions les plus extrêmes, ils vont infléchir la courbe vers le bas en cas d'amplification, vers le haut en cas de limitation.

Ce mode de discrimination présente l'avantage de correspondre précisément au problème posé à l'ingénieur, qui va avoir défini ses cas limites au voisinage de l'intersection de la

droite du second ordre, augmentée d'une marge pour tenir compte des linéarités supplémentaires, avec la probabilité cible. Les conséquences, si ce cas limite se trouve repoussé à des hauteurs plus élevées, sont non seulement un accroissement de la hauteur, mais également une augmentation de l'incertitude, inversement proportionnelle à la pente de la droite, et ce dans un domaine où les conséquences varient elles aussi brutalement : impact sur les œuvres mortes d'une plate-forme fixe, bien plus sensibles aux vagues que les parties inférieures, eau « verte » sur le pont et les panneaux de cale pour un navire marchand, les hublots ou les galeries vitrées pour un ferry, etc.

On notera par contre avec frustration que si la méthode permet de détecter la présence d'une éventuelle seconde population statistique, elle ne permet pas de décider, en présence d'une observation extrême individuelle, si celle-ci appartient à l'une ou l'autre de ces deux populations.

2.3. Autres critères

On peut imaginer de distinguer des vagues anormales par leur forme qui s'éloignerait de celle donnée par l'approximation du second ordre. Cela aurait également l'avantage de ne pas focaliser l'étude sur la seule hauteur, et de faire intervenir d'autres paramètres comme la dissymétrie qui jouent un rôle non négligeable dans certains accidents. Toutefois, ainsi que le rapportent Dysthe *et al* [4], les ordres plus élevés qui se manifestent dans les observations extrêmes sont pris en compte par les théories décrivant les vagues individuelles pour le dimensionnement : Newwave correspondant à la forme de la fonction d'auto-corrélation dans le cas gaussien démontrée par Lindgren [5], ou Stokes au cinquième ordre. La déviation par rapport au second ordre, plus visible sur la forme que sur la hauteur, n'est donc pas un critère discriminant, et il faudrait pouvoir mettre en évidence des déviations par rapport à ces théories plus élaborées, ce qui n'a pas été observé jusqu'à présent dans la nature.

3. STATISTIQUES OBSERVÉES

Nombre d'auteurs affirment en préambule de leurs études qu'on aurait observé beaucoup plus de vagues scélérates que ce que les

théories classiques laissent prévoir. Cependant, faute de données en nombre suffisant et d'une bonne fiabilité, assez peu d'études statistiques ont pu être conduites sur de véritables mesures de terrain, et si elles mettent bien en évidence l'existence de vagues extrêmes, aucune à notre connaissance n'en a observé plus sur le long terme que ce que prévoyaient les théories classiques au second-ordre.

3.1. Cas de Gorm

Un des articles les plus cités à l'appui de l'existence de vagues scélérates en grand nombre est celui de Sand *et al* au workshop de Molde en 1989 [6]. Il traite de mesures obtenues sur le champ de Gorm, dans la partie danoise de la mer du Nord. On y note entre autres deux vagues entre 16 et 18 mètres par des Hs de 7 à 8 mètres, et présentant des caractéristiques d'asymétrie tout à fait remarquables. La courbe de la densité de probabilité dévie de manière très marquée du Rayleigh de la théorie linéaire à partir d'un rapport Hmax/Hs de 2.

Toutefois, déjà Dean [7] lors de ce même workshop avait avancé que les non-linéarités pouvaient sans doute expliquer ce type de déviation, et si l'on remarque que la profondeur n'est que de 40 mètres sur le site et que la mesure par radar depuis une plate-forme ne gomme aucune des non-linéarités contrairement à ce qui se passe avec des bouées, ces vagues rentrent presque dans le rang une fois corrigées des non-linéarités de profondeur finie et d'un probable début de déferlement.

3.2. Champ de Frigg

Nous avons pu disposer de la plus grande partie des mesures effectuées dans les années 80 et 90 sur les plates-formes du champ de Frigg, dans la partie centrale de la mer du Nord. Après un travail considérable de validation, près de 19000 enregistrements de 17 minutes de la surface libre par radar ont pu être conservés, représentant environ 50 millions de vagues individuelles. Les vagues maximales de ces enregistrements ont été comparées au modèle statistique de Nerzic et Prevosto [8], et les résultats de cette comparaison sont présentés aux figures 2 et 3.

On constate, figure 2, que même pour les plus grandes vagues, que certains auteurs ont listé comme anormales, le modèle ajusté pourtant sur des vagues moins extrêmes convient parfaitement. La figure 3, qui considère les hauteurs normalisées par la hauteur significative de l'enregistrement, est moins déterminante. Un certain nombre d'éléments conduisent néanmoins à ne pas remettre en cause la normalité des observations, notamment l'incertitude sur l'estimation de la hauteur significative qui pourrait être sous-évaluée dans certaines conditions, ainsi que celle sur les paramètres du modèle dans certaines situations.

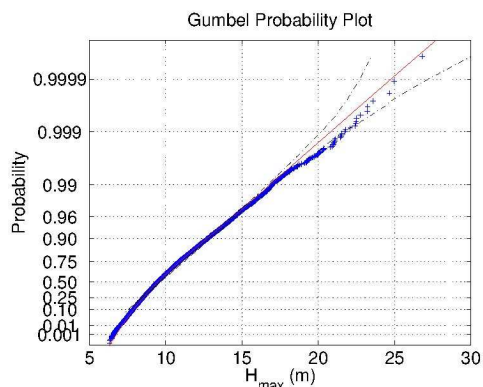


Figure 2 Comparaison de la distribution empirique des hauteurs avec la prédiction par Nerzic *et al* [8]

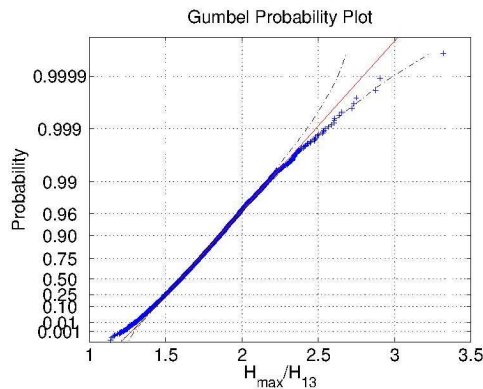


Figure 3 : Comparaison de la distribution empirique de la hauteur normalisée avec la prédiction par Nerzic *et al*

De plus, la formule utilisée ne prend pas en compte les non-linéarités au delà du second ordre, dont Prevosto et Bouffandeau [9] ont pu montrer sur un autre cas qu'elles pourraient affecter les probabilités d'un facteur 10 dans certaines conditions.

3.3. Champ d'Alwyn

Les données du champ d'Alwyn ont été principalement analysées par Linfoot [10] et Wolfram [11]. La sélection qu'ils ont faite d'enregistrements contenant des vagues extrêmes a conduit certains auteurs à qualifier ces vagues d'anormales, alors qu'eux-mêmes se sont montrés beaucoup moins catégoriques, ne détaillant d'ailleurs ni le processus de sélection utilisé, ni celui essentiel de validation des données. Nous avons pu nous procurer ces données. Le travail de validation a conduit à l'élimination de 34% des 71510 enregistrements de 20 minutes.

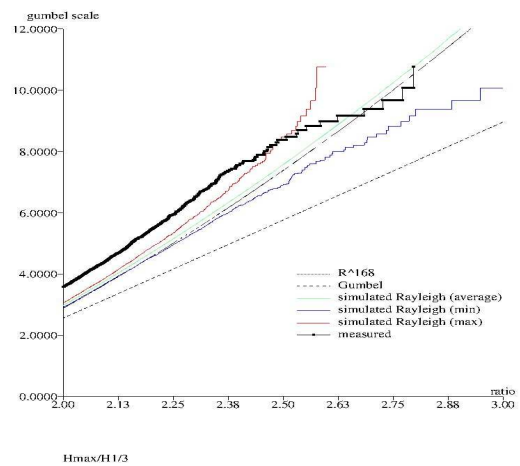


Figure 4 Comparaison de la distribution empirique des rapports H_{max}/H_s avec le modèle linéaire simulé et la loi asymptotique de Gumbel

La figure 4 montre que, là encore, il n'y a pas de déviation sensible par rapport à la prédiction obtenue à partir de la simple distribution de Rayleigh correspondant à la théorie linéaire. On remarque par contre que les plus extrêmes mis à part, les ratios n'atteignent même pas, tant qu'ils sont inférieurs à 2.5, les maxima obtenus sur 2000 simulations de variables aléatoires de Rayleigh en mêmes nombres que les vagues des états de mer de la base de données.

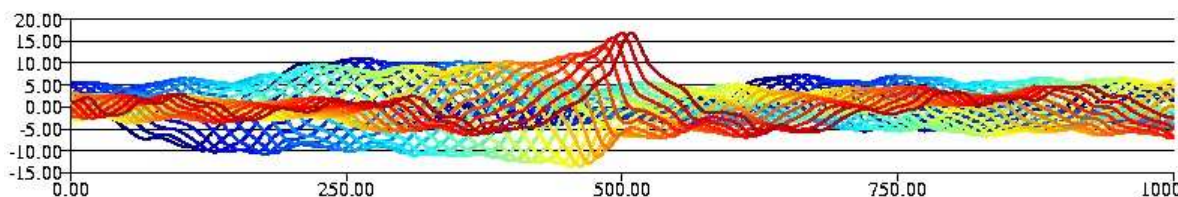


Figure 7 Reconstitution spatio-temporelle de la vague du Nouvel An

3.4. La vague du Nouvel An

Peu de vagues ont suscité autant d'études que la vague dite du Nouvel An, mesurée à partir de la plate-forme Draupner en mer du Nord le 1^{er} janvier 1995 [12]. Pour les scientifiques, cette vague présente les avantages d'avoir été mesurée avec précision et validée par des dégâts mineurs à la plate-forme, et elle était d'une hauteur proche de la hauteur de dimensionnement alors que la tempête, bien que violente, n'excédât pas ce qui se rencontre tous les trois ou quatre ans dans cette partie de la mer du Nord. La crête s'est élevée à 18.5 m pour un Hs de l'ordre de 12 m. La hauteur crête-creux est de 26 m, mais un certain nombre de reconstitutions comme celle de la figure 7 concourent à laisser penser qu'un creux de près de 15 m la précédait de quelques secondes à une faible distance et qu'un navire aurait lui subi la totalité des 33 m séparant ce creux de la crête. Sur le moment, des doutes légitimes sont donc apparus sur la qualité des procédures de dimensionnement si la vague dite de design se rencontrait aussi facilement.

Un certain nombre d'études ont toutefois permis de tempérer ces doutes. Reistad *et al* [13] ont montré qu'il n'était guère possible d'avoir des tempêtes beaucoup plus sévères et il apparaît maintenant que classer la tempête en fonction de son Hs en sous-évaluait probablement indûment la sévérité réelle en termes de vagues maximales.

3.5. Autres mesures

Dysthe *et al* [4] rapportent d'autres observations, pour lesquelles il est difficile d'établir le nombre de vagues total de la base de données auquel il est pourtant nécessaire de les rapporter pour éviter le biais dit de « data mining ». Dans certains cas, il est très difficile d'accorder confiance aux instruments de

mesure, les valeurs qui peuvent atteindre jusqu'à plus de 10 fois Hs n'ayant pas été corroborées par les dégâts auxquels on pourrait pourtant s'attendre. En ce qui concerne les mesures validées, les auteurs n'observent par contre pas non plus de dépassement des valeurs prédites par les modèles statistiques, prenant en compte les non-linéarités, de Naess [14] ou Forristall [15].

3.6. Mesures par satellite

Certains travaux, notamment ceux de Lehner [16] et Rosenthal [17], ont pu donner l'espoir que l'imagerie par les satellites d'observation de la terre permettrait de recenser les vagues scélérates là où on ne peut installer des instrumentations *in situ*. L'écho médiatique donné à ces travaux de qualité a toutefois fait oublier la difficulté de calibrer sur une vérité terrain en conditions extrêmes les algorithmes d'inversion des images de radar à ouverture synthétique (SAR) et les hypothèses sur lesquelles ils sont basés, notamment les théories de houle qu'il faut leur injecter pour rapprocher ce que fournit l'ouverture synthétique de ce qui serait obtenu avec une ouverture réelle. Néanmoins, si ces difficultés pouvaient être surmontées, le SAR embarqué sur satellite serait sans nul doute un outil privilégié pour observer les vagues scélérates et en faire des statistiques.

4. MÉCANISMES DE GÉNÉRATION

Une vague scélérate représente une forte concentration d'énergie dans une portion réduite de temps et d'espace et l'on peut imaginer trois types de mécanismes de focalisation pour y conduire : focalisation spatiale, effet de la dispersion temporelle, interactions non-linéaires entre vagues.

4.1. Focalisation spatiale

Outre la rencontre de trains de vagues de directions différentes, par exemple générées par le secteur chaud et la descente d'air froid d'une perturbation, les circonstances propices sont la réfraction sur une bathymétrie variable ou sur un courant hétérogène. Le cas du courant a été étudié par de nombreux auteurs, notamment en raison des accidents survenus dans le courant des Aiguilles qui longe en descendant de l'océan Indien la côte sud-est de l'Afrique du Sud.

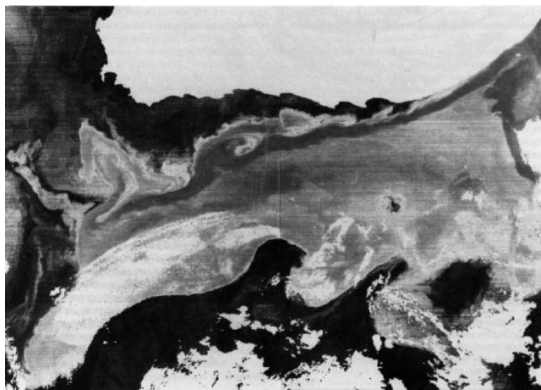


Figure 8 Le courant des Aiguilles, bien visible sur l' image thermique obtenue par un satellite de la NOAA. On en voit notamment les méandres à proximité de la côte où l'on reconnaît la ville du Cap et sa géographie en crochet en haut à gauche de l'image.

Les chercheurs y ont observé de fortes vagues après le passage de dépressions au large du Cap ayant généré de forts vents et de fortes houles de sud-ouest. Lavrenov [18], notamment, a montré la possibilité pour ces houles de se trouver piégées dans le flux lorsqu'il s'élargit au sud d'East London. Les méandres sont également des facteurs de piégeage, la hauteur significative allant jusqu'à doubler dans ses simulations numériques, ce qui est confirmé par des mesures satellitaires. Par contre, l'hypothèse d'amplification au voisinage des caustiques qu'on peut observer lorsque la houle incidente est unidirectionnelle semble exiger une trop faible dispersion angulaire de cette dernière pour être une explication vraisemblable dans la nature.



Figure 9 Vague pyramidale obtenue par interaction d'un soliton et de son double provenant d'une réflexion sur un obstacle hors du champ (T. Soomere [19])

La focalisation directionnelle n'a été que peu étudiée, sans doute parce que l'étalement directionnel par lui-même joue contre l'apparition de vagues extrêmes, et que seuls des cas où les deux composantes sont très étroite en direction, comme pour les vagues de sillage de ferries étudiées dans la Baltique par Soomere et Engelbrecht (Figure 9).

4.2. Effet de la dispersion

Les vagues sont des ondes dispersives dont la célérité varie en fonction de la longueur d'onde (ou de la période). Il en découle un procédé simple pour construire une vague extrême en bassin ou en canal : envoyer des ondes de période croissante dans le champ d'expérimentation. Avec un ajustement judicieux des phases, les vagues parviennent toutes ensemble au même point, créant une vague énorme. On peut montrer que superposer un champ de vagues aléatoires à ce phénomène ne le détruit pas quoiqu'il l'atténue, et certains auteurs l'avancent donc comme explication aux observations faites dans la nature, sans toutefois pouvoir préciser quelles conditions particulières permettraient d'induire l'arrangement bien particulier nécessaire du train de vagues.

4.3. Interactions non-linéaires

La focalisation par interaction non-linéaire est sans aucun doute le mode de génération le plus étudié à l'heure actuelle. Il fait l'objet de recherches théoriques, numériques et expérimentales en bassin. C'est également cet aspect qui est au cœur de l'analogie avec des phénomènes obtenus par certaines équipes dans des fibres optiques.

L'évolution dans sa propagation d'un train d'ondes monochromatiques est sujette à l'instabilité dite de Benjamin-Feir. Pour un spectre étroit, l'enveloppe du train d'ondes évolue suivant une variante de l'équation de Schrödinger non-linéaire (NLS), mise en évidence notamment par Dysthe [20].

Dans l'espace à deux dimensions, l'équation NLS admet certaines solutions exactes simples qu'on associe généralement aux vagues scélérates. Parmi ces solutions, on trouve le soliton d'enveloppe et des modes de respiration du groupe de vagues dont le plus simple a été mis en évidence par Peregrine [21]. On obtient ainsi de bonnes approximations des résultats de simulations numériques, mais il est hautement improbable que les conditions initiales à partir desquelles de telles vagues pourraient se développer puissent apparaître spontanément dans la nature.

L'instabilité de Benjamin-Feir peut cependant apparaître pour des champs de vagues à spectre simplement étroit, et Onorato, Osborne et d'autres (p. ex. [22]) ont pu le vérifier expérimentalement en canal. Là encore, il est loin d'être évident que les conditions propices puissent se trouver réunies dans la nature : l'étalement directionnel, les effets du vent à la surface tels que moutonnement et déferlement, et la différence entre un spectre idéal et sa réalisation aléatoire rendent très volatils dans la réalité les indicateurs d'instabilité de Benjamin-Feir (cambrure rapportée à la largeur de bande [23]) qu'on peut associer à un état de mer, et il est irréaliste d'en attendre une évolution vers un dépassement de seuil semblable à ce qu'on observe en conditions contrôlées, canal ou simulation numérique.

4.4. Comparaison avec les observations

L'indicateur d'instabilité de Benjamin-Feir présente l'attrait de la facilité apparente de calcul, mais en réalité cambrure « moyenne » et largeur de bande sont des caractéristiques difficiles à estimer à partir de courtes observations, et peu susceptibles d'être stationnaires sur des durées plus longues. A la différence de ce qu'on peut imposer en laboratoire dans des essais en bassin ou des simulations numériques, les historiques observés sont donc excessivement fluctuants.

Janssen et Mori [23] ont montré qu'en raison des interactions entre vagues quatre à quatre, indicateur d'instabilité et kurtosis étaient corrélés. On peut hélas en conclure à l'impossibilité d'isoler, dans les mesures fluctuantes de l'indicateur, de faibles variations annonciatrices du phénomène alors que ce dernier va ensuite imposer une variation explosive à l'estimateur du même indicateur.

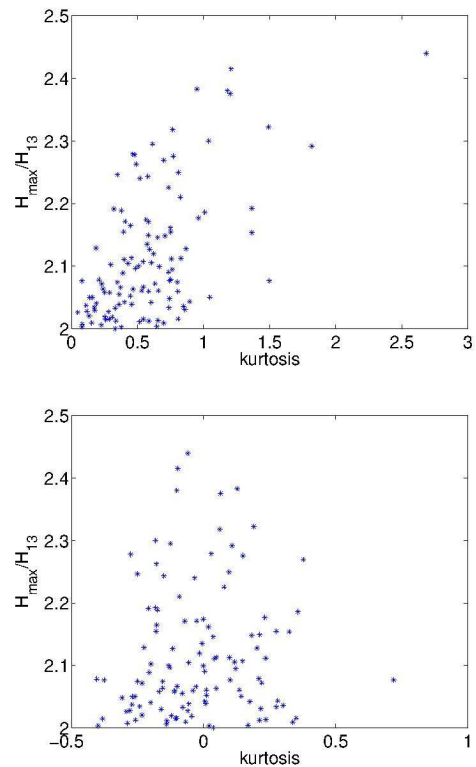


Figure 10 Kurtosis calculée pour l'état de mer où apparaît une vague extrême, avec cette vague (haut) et en ôtant la vague (bas)

Compte tenu de la difficulté d'estimer l'indicateur d'instabilité de Benjamin-Feir sur de courts enregistrements, nous nous sommes intéressés à la kurtosis. La corrélation évoquée précédemment apparaît sur la partie haute de la figure 10 : les états de mer offrant les plus forts ratios H_{max}/H_s sont également ceux pour lesquels la kurtosis de l'élévation de la surface libre est la plus élevée. Toutefois, si on estime la kurtosis en retirant de la séquence la période de quelques secondes correspondant à la vague extrême, cette corrélation disparaît totalement et la kurtosis est à nouveau centrée sur le zéro d'un phénomène gaussien, comme on peut le voir sur la partie basse de la figure.

Ce n'est donc pas l'augmentation de la kurtosis, ou de l'indicateur d'instabilité qui lui est corrélé, qui serait la manifestation d'une probabilité accrue d'occurrence de vague scélérate, mais la vague scélérate qui génère une augmentation de l'estimateur de l'indicateur d'instabilité, lequel n'est qu'un indicateur sans réel pouvoir prédictif. Une présentation détaillée de ces questions avait d'ailleurs été faite à l'Atma en 2004 [24].

L'ensemble des conditions aux limites nécessaires à l'activation des mécanismes décrits plus haut ne peut se condenser dans ce simple indicateur. En conséquence, d'une part l'observation n'apporte ni confirmation ni infirmation à l'hypothèse que l'un ou plusieurs de ces mécanismes soient en jeu dans la nature, et d'autre part l'utilisation de cet indicateur pour la prévision est *a priori* vouée à l'échec.

5. PRÉVISION

Depuis la fin des années 90, les services météorologiques d'Afrique du Sud ont mis en place des systèmes d'alerte pour avertir les navigateurs lorsque les conditions sont réunies pour l'apparition de vagues extrêmes dans le courant des Aiguilles. Ces avertissements ont considérablement réduit le nombre des accidents dans la zone, et il serait particulièrement souhaitable de pouvoir émettre des alertes analogues pour les tempêtes à risque si les conditions d'apparition y étaient aussi clairement définies.

Les tentatives de fourniture d'indicateurs de vagues anormales, fondés sur des critères d'indicateur d'instabilité de Benjamin-Feir, par les services météorologiques, notamment le Centre Européen de Prévision à moyen-terme (ECMWF), n'ont toutefois pas eu les résultats espérés. On a vu dans la section précédente les raisons probables de cette déception.

Dans notre mémoire de 2004, nous indiquions la possibilité de recourir à des experts météorologues pour pallier les insuffisances des critères automatiques. Un tel service, « EXtreme Wave Warning Service », a été mis en place entre certaines compagnies pétrolières qui exploitent des champs en mer du Nord et la Météorologie Norvégienne, avec des résultats jugés satisfaisants par les opérateurs des

plates-formes sur la base de 20 ans d'expérience sans accident. Toutefois, la généralisation à la navigation maritime où ni les zones géographiques, ni les critères d'exploitation des navires ne sont définis avec précision, ne paraît pas réalisable sans engager des dépenses extravagantes.

Nous en sommes réduits à rappeler, sans pouvoir chiffrer l'accroissement du risque associé, quelques facteurs qui doivent inciter à renforcer sa vigilance :

- les champs de vagues dus à des dépressions complexes, notamment celles dont la trajectoire revient sur elle-même ;
- les dépressions dont le centre se déplace en phase avec le champ de vagues qu'elles créent ;
- la proximité du front froid des perturbations ;
- des conditions de mer d'apparence globalement moins sévères que ce que l'on aurait dû attendre compte tenu de la météo.

6. CONCLUSION

Pour l'ingénieur ou l'architecte naval, il n'y a à l'heure actuelle pas d'inquiétude particulière à avoir vis-à-vis des vagues scélérates : Si leurs caractéristiques s'éloignent des théories utilisées pour le dimensionnement, ce qui n'est pas prouvé, ce sera de toute façon à des niveaux de probabilité plus faibles que ceux qu'il est actuellement demandé de considérer. Face à des exigences de fiabilité toujours croissantes, il sera toutefois nécessaire de réexaminer périodiquement cette position, aucune garantie n'ayant été obtenue que cette conformité au modèle conventionnel persiste à des niveaux de probabilité d'occurrence plus faibles.

Au-delà de la question d'élucider la question de la normalité de ces vagues et du défi scientifique qu'elle représente, il n'en demeure pas moins que pour les opérations en mer, dont celles comme la pêche où le danger principal est le chavirement, les connaissances dont on dispose des caractéristiques de ces vagues et des conditions susceptibles de favoriser leur apparition restent largement insuffisantes. Le

sujet est délicat à étudier par manque de données fiables. Un effort financier supplémentaire considérable serait souhaitable et nécessaire pour collecter suffisamment de données sur ces événements rares afin de garantir leur significativité statistique et leur qualité, et d'offrir aux développements théoriques des occasions de validation en conditions réelles.

7. RÉFÉRENCES

- [1] S.P. Kjeldsen – Risk analysis concentrated on wave crest kinematics – Rogue Waves 2008 – Brest – Octobre 2008
- [2] A. Robin, M. Olagnon – Occurrence of extreme waves with respect to significant wave height – 10th OMAE Conference – Stavanger – 1991
- [3] S. Haver – Freak waves: a suggested definition and possible consequences for marine structures – Rogue Waves 2004 – Brest – Octobre 2004
- [4] K. Dysthe, H.E. Krogstad, P. Müller – Oceanic Rogue Waves – Annu. Rev. Fluid Mechanics – 2008 – 40:287-310
- [5] G. Lindgren – Local maxima of Gaussian fields – Ark. Mat. – 1972 – 10:195-218
- [6] S.E. Sand, N.E. Ottensen Hansen, P. Klinting, O.T. Gudmestad, M.J. Sterndorff – Freak wave kinematics – Water Wave Kinematics – Molde - 1989
- [7] R.G. Dean – Freak waves: a possible explanation – Water Wave Kinematics – Molde - 1989
- [8] R. Nerzic, M. Prevosto – A Weibull-Stokes model for the distribution of maximum wave and crest heights – Int. J. Offshore Mech. Arct. Eng. – 1998
- [9] M. Prevosto, B. Bouffandeau – Probability of occurrence of a giant wave crest – 21st OMAE Conference – 28446 – 2002
- [10] B. Linfoot, J. Wolfram, P. Stansell – On the characteristics of storm waves – Int. conf.. Offshore Polar. Eng. – Seattle, 2000
- [11] J. Wolfram, B. Linfoot, P. Stansell – Long and short term extreme wave statistics in the North Sea – Rogue Waves 2000. – Brest, 2000
- [12] S. Haver – A possible freak wave event measured at the Draupner Jacket January 1st 1995 – Rogue Waves 2004 – Brest – Octobre 2004
- [13] M. Reistad, A.K. Magnusson, S. Haver, O.T. Gudmestad, D. Kvamme – How severe wave conditions are possible on the Norwegian continental shelf ? – Marine Structures. – 2005 – 18:428-50
- [14] A. Naess – On the distribution of crest to trough wave heights – Ocean Eng.. – 1985 – 12:221-34
- [15] G.Z. Forristall – Wave crest distributions: observations and second-order theory – J. Phys. Ocean... – 2000 – 30:1931-43
- [16] S.H. Lehner – Radar measurements of extreme ocean waves – Aha Huliko'a workshop. – Honolulu -- Janvier 2005
- [17] W. Rosenthal – Sea state statistics and extreme waves observed by satellite – Rogue Waves 2004 – Brest – Octobre 2004
- [18] I. Lavrenov – The wave energy concentration at the Agulhas current of South Africa – Nat. Hazards. – 1998 – 17:117-27
- [19] T. Soomere, J. Engelbrecht – Extreme elevations and slopes of interacting Kadomtsev-Petviashvili solitons in shallow water – Rogue Waves 2004 – Brest – Octobre 2004
- [20] K.B. Dysthe – Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for application to deep water waves – Proc. Royal Soc. London. A – 1979 – 369:105-14
- [21] D.H. Peregrine – Water waves, nonlinear Schrödinger equations and their solutions – J. Aust. Math. Soc. B – 1983 – 25:16-43
- [22] M. Onorato, A.R. Osborne, M. Serio, L. Cavalieri, C. Brandini, C.T. Stansberg – Observation of strongly non-Gaussian statistics for random sea surface gravity waves in wave flume experiments – Phys. Rev. – 2004 – 70:067302

[23] N. Mori, P.A.E.M. Janssen, M. Onorato –
Directional dispersion effects on kurtosis
for freak wave prediction – Rogue Waves
2008 – Brest – Octobre 2008

[24] M. Olagnon, A.K. Magnusson –
Confrontation d’hypothèses sur les vagues
exceptionnelles avec des statistiques en
mer du Nord –. ATMA – 2004