

Les vagues scélérates

Auteur : Mansour IOUALALEN
Institut de recherche pour le développement, IRD,
UMR Géoazur n°7329, UNS/CNRS/IRD/OCA, Sophia Antipolis

Que sont les vagues scélérates ?

Les vagues scélérates (ci-après VS, ou encore *rogue waves* ou *freak waves* en anglais, figure 1) sont des vagues isolées anormalement élevées, **comparées au champ de vagues avoisinantes**. Ce terme a été proposé en 2000, à l'occasion du premier atelier organisé sur ce thème, à Brest, par l'IFREMER et l'IRCN [7].



Figure 1. Vague scélérate vue d'un navire marchand (1940, golfe de Gascogne, ligne de sonde des 100 brasses). Source : NOAA.

On parle de VS lorsque leur hauteur est au moins le double de la hauteur significative des vagues avoisinantes [6,8] (figure 2, au temps $t = 260$ s), tout en ayant des longueurs d'ondes similaires. On doit distinguer les VS des *i.* vagues extrêmes, issues de conditions météorologiques anormales, *ii.* des vagues issues de confluence de courants marins comme dans le cas du courant des Aiguilles en Afrique du sud, ces vagues ayant des hauteurs statistiquement régulières, ou encore *iii.* des tsunamis [10].

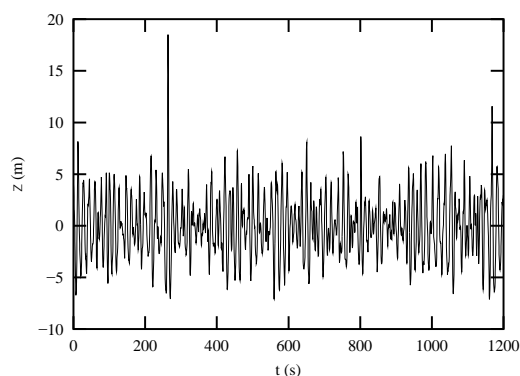


Figure 2. Enregistrement d'une vague scélérate à la plate-forme pétrolière de Draupner, Norvège, le 1^{er} janvier 1995 à 15h20 [9].



C'est précisément, parce que les VS sont *anormales* et sporadiques dans un champ de vagues donné auquel les marins s'adaptent spontanément, qu'elles échappent à leur vigilance ; elles sont dangereuses parce qu'inattendues. Par ailleurs, dans certains des cas mentionnés, les vagues furent si importantes (de l'ordre de 30 m de hauteur), que les marins n'auraient pas pu les affronter même si elles avaient pu être anticipées. Les marins y sont cependant de plus en plus attentifs car elles sont de nos jours plus fréquemment signalées par les navigants. Cette vigilance s'est également accrue parce que les VS sont, depuis peu, l'objet d'approches plus scientifiques. On trouvera une synthèse des travaux en cours et leurs perspectives dans [3,4] : tenter de mieux comprendre leurs mécanismes et leurs conditions de génération, et diffuser les résultats de ces travaux, contribuent à **mieux susciter cette vigilance**.

Que sait-on sur le phénomène des vagues scélérates ?

Bien que les VS soient connues dans tous les océans, la plupart de celles qui ont été signalées ont été observées dans des situations particulières. Elles correspondent à des zones de confluence de plusieurs systèmes de houles. Cela conduit à proposer au moins deux types de mécanismes pour leur formation [7], outre les effets possibles du vent et des courants :

- i. un mécanisme de modulation de la houle dû aux non-linéarités des vagues et à une instabilité particulière que nous détaillerons plus loin ;
 - ii. et un processus de focalisation (accumulation de vagues) pouvant être dû (*ii.1*) à la nature très dispersive des vagues, ou (*ii.2*) à des zones côtières dont les profils bathymétriques sont inhomogènes.
- i. Les vagues font l'objet **d'un processus de modulation** dû à une **instabilité** dite **de Benjamin-Feir** [2] (BF ci-après). Nous connaissons tous ce phénomène : on peut facilement observer au bord d'une plage que certaines crêtes de vagues sont plus élevées que d'autres. Quel est le mécanisme engendrant cette modulation ? Le spectre d'un champ de vagues est continu et composé de pics dominants, mais plusieurs composantes fréquentielles coexistent. Or nous savons que, lorsque deux composantes de fréquences plus ou moins proches interagissent, il en résulte une composante induite de fréquence égale à la moitié de la différence entre les deux composantes. Dans la mesure où cette différence demeure faible (les deux fréquences étant proches) la fréquence induite est plus faible, et on obtient alors une modulation de la paire de composantes proches. Donc plus les fréquences de la paire sont proches, plus la modulation est *large* (plus la périodicité d'apparition des grandes crêtes est basse). Le spectre d'un champ de vagues étant large, on pourrait penser qu'un nombre incalculable de processus de modulation pourraient émerger. Cependant on montre, par des calculs de stabilité de champs de vagues, qu'une seule fréquence modulationnelle induite (instabilité dominante de BF) émerge effectivement pour une cambrure de vague donnée [2,5,6]. Plus une vague est cambrée plus sa modulation est *courte*, au sens que plus les crêtes les plus hautes sont proches. Cela est dû au fait que plus la vague est cambrée, plus elle est non-linéaire : elle aura ainsi davantage le *pouvoir* de faire inter-agir des fréquences relativement éloignées les unes des autres. Ce processus de modulation s'opère naturellement de manière continue au fur et à mesure de la propagation des vagues. [Par ailleurs, la dissipation visqueuse a tendance à effacer plus rapidement les hautes fréquences. Ainsi avec le temps, seules persistent les enveloppes (les fréquences induites) : les vagues sont de plus plus en plus longues, et leur fréquence diminue avec l'âge (c'est le processus de formation de la houle)].

Revenons aux vagues scélérates : l'instabilité de BF pourrait être l'une des causes probables de la génération des VS dans une configuration de confluence de deux trains d'ondes. Cette instabilité initie, naturellement, une modulation pour chaque train d'onde, avec apparition d'une



crête dominante pour chacun d'eux. La confluence de deux (ou plus) modulations pourrait amplifier une crête dominante induite dans certaines configuration de phases entre les deux crêtes initiales. Ce processus pourrait être amplifié si l'on y ajoute l'occurrence du processus de focalisation décrit ci-après.

- ii. **(ii.1).** Un autre mécanisme potentiel de formation des VS concerne la nature très dispersive des vagues dont la vitesse de propagation dépend de la fréquence : les composantes de plus basse fréquence, se propageant plus rapidement, *rattrapent* celles de plus haute fréquence. Cette accumulation, ou **focalisation**, pourrait provoquer une amplification substantielle du champ de vagues. Or, dans le cas d'un champ de vagues *régulier*, la composante basse fréquence (l'oscillation fondamentale de la houle) est dominante : les autres composantes fréquentielles ont quant à elles des amplitudes respectives moindres. Ainsi la focalisation ne saurait être significative. Cependant, lorsque deux ou plusieurs houles se rencontrent, l'accumulation peut devenir critique car elle peut concerner deux ou plusieurs composantes principales des houles respectives, et générer ainsi une vague isolée plus importante, une VS. Les non-linéarités peuvent éventuellement accroître ce processus d'amplification.

(ii.2) Un autre processus de focalisation de vagues peut provenir d'une autre origine [10] : en zone côtière (en eau peu profonde), une grande houle se comporte comme une onde longue, i.e., sa longueur d'onde est grande comparée à la profondeur d'eau locale. Elle est donc peu dispersive [1]. Dans ce cas, sa vitesse de propagation est presque exclusivement liée à la profondeur de la colonne d'eau (approx. $(gh)^{1/2}$) où g est l'accélération de la gravité et h la profondeur de la colonne d'eau [1]. Ainsi, puisque la célérité de l'onde dépend presque exclusivement de la profondeur de la colonne d'eau locale, une ligne iso-bathymétrique (courbe de niveau des hauteurs d'eau) est aussi une ligne d'iso-célérité de l'onde. Ainsi il advient que par réfraction, les lignes de crête de la vague *épousent* les lignes iso-bathymétriques. On comprend alors que dans certaines configurations d'inhomogénéité bathymétrique (crêtes des vagues disposées en courbe plutôt que rectilignes), la réfraction puisse forcer un train de vagues à converger vers une zone restreinte que l'on appelle les **caustiques**. Cette zone, qui est une zone de focalisation tout comme en optique, pourra alors générer une amplification substantielle de la vague et éventuellement donner lieu à une VS.

En conclusion : Les mécanismes physiques mis en jeu dans la formation des VS (instabilités hydrodynamiques, interactions d'ondes, focalisation, etc.) sont connus depuis plusieurs dizaines d'années car ils ont permis d'expliquer les mécanismes de formation et de transitions de la houle, mais ce n'est que depuis peu que l'on a pensé à les re-visiter pour le cas particulier des VS. Il en est de même des expérimentations en bassin à houle qui sont également mis à contribution. L'étude de ces mécanismes est nécessaire mais elle n'est pas à ce jour suffisante pour développer des systèmes d'observation et de prédiction des vagues scélérates. Ceci parce que leurs échelles spatio-temporelles (ST) sont trop fines pour être modélisées physiquement à l'échelle d'un domaine marin. Une approche stochastique (analyse de l'occurrence de VS dans un domaine ST) pourrait être plus abordable mais on dégraderait considérablement la précision ST de leur occurrence, précisément parce que les observations des VS sont rares. Tout au plus pourrait-on donner une cartographie des zones de forte occurrence, si celles-ci existent réellement. Mais à quoi servirait une telle cartographie pour un phénomène si sporadique ? Reste leur possible détection. Les altimètres embarqués sur satellites ne permettent pas de détecter uniformément des phénomènes si ponctuels et de si petite échelle ST. Peut-être des radars embarqués sur navires pourraient-ils détecter ces anomalies de hauteur de vagues à condition de développer des logiciels cohérents d'interprétation des signaux rétro-diffusés.

Pour en savoir plus :

- [1] Airy G. B. (1845). Tides and waves. *In : Encyclopaedia Metropolitana*, Londres, tome V, p. 289.
- [2] Benjamin T.B. & Feir J.E. (1967). The desintegration of wave trains on deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 27, 417-430.
- [3] Dysthe K., Krogstad H.E. & Muller P. (2008). Oceanic rogue waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 287-310.
- [4] Kharif C., Pelinovsky E. & Slunyaev A. (2009). *Rogue Waves in the Ocean*. Berlin, Heidelberg : Springer. Doi:1007/978-3-540-88419-4.
- [5] Ioualalen M. & Kharif C. (1994). On the subharmonic instabilities of steady three-dimensional deep water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 262, 265-291.
- [6] Mclean. J.W. (1982). Instabilities of finite amplitude water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 114, 315-330.
- [7] Olagnon M. & Athanassoulis G.A. (Eds.) (2001). *Rogue Waves 2000: Proceedings of a Workshop in Brest, France, 29-30 November 2000. Actes de Colloques - IFREMER*, 32. Éditions IFREMER, Plouzané, 395 p.
- [8] Olagnon M. & Kerr J. (2015). *Anatomie curieuse des vagues scélérates*. Ed. Quae, Versailles, 176 p.
- [9] Trulsen K. (2000). Simulating the spatial evolution of a measured time series of a freak wave. *In : Rogue Waves 2000: Proceedings of a Workshop in Brest, France, 29-30 November 2000. Actes de Colloques - IFREMER*, 32. Éditions IFREMER, Plouzané, 265-273.

Fiche de l'Institut océanographique :

- [10] Mansour Ioualalen, novembre 2015. *Les tsunamis*.
<http://www.institut-ocean.org/images/articles/documents/1447084820.pdf>