



**HAL**  
open science

## **L'hydrodynamique des vagues du large jusqu'à la côte : modélisation et impacts**

Michel Benoit, Jeffrey Harris, Marissa Yates

### ► **To cite this version:**

Michel Benoit, Jeffrey Harris, Marissa Yates. L'hydrodynamique des vagues du large jusqu'à la côte : modélisation et impacts. *Transitions. Les nouvelles Annales des Ponts et Chaussées*, 2025, 5, pp.44-48. <hal-05461466>

**HAL Id: hal-05461466**

**<https://hal.science/hal-05461466v1>**

Submitted on 9 Feb 2026

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License



# L'hydrodynamique des vagues du large jusqu'à la côte : modélisation et impacts

Michel Benoit

Chercheur-senior, EDF R&D, LHSV

Jeffrey Harris

Chargé de recherche, École nationale des ponts et chaussées, LHSV

Marissa Yates

Chargée de recherche, École nationale des ponts et chaussées, LHSV

## Introduction

Les vagues sont des ondes de gravité créées par l'action du vent à la surface de la mer. Il existe une variété de conditions de vagues suivant la durée et la distance d'action (le *fetch*) du vent. On parle de « mer de vent » ou de clapot pour désigner des vagues jeunes, en phase de croissance dans la zone d'action du vent, avec des périodes courtes (1 à 7 s), une direction de propagation moyenne alignée avec celle du vent et une cambrure, c'est-à-dire un rapport  $H/L$  entre la hauteur des vagues ( $H$ ) et leur longueur d'onde ( $L$ ), plutôt élevée. La houle océanique correspond à des vagues plus âgées, qui se sont propagées sur de grandes distances hors de leur zone de génération, avec des périodes longues (12 à 30 s). La houle présente un aspect plus régulier, avec une cambrure plus faible. La hauteur des vagues extrêmes dans l'océan peut atteindre 25 m, voire 30 m dans des conditions extrêmes de tempêtes. Depuis 25 ans, l'étude des vagues dites « scélébrates » est un sujet d'intérêt majeur<sup>1</sup>.

Il existe différentes techniques pour mesurer les vagues en mer et en laboratoire. Historiquement, les premières bases de données de vagues étaient constituées par des observations visuelles de marins naviguant sur les différentes mers du globe. Depuis le milieu

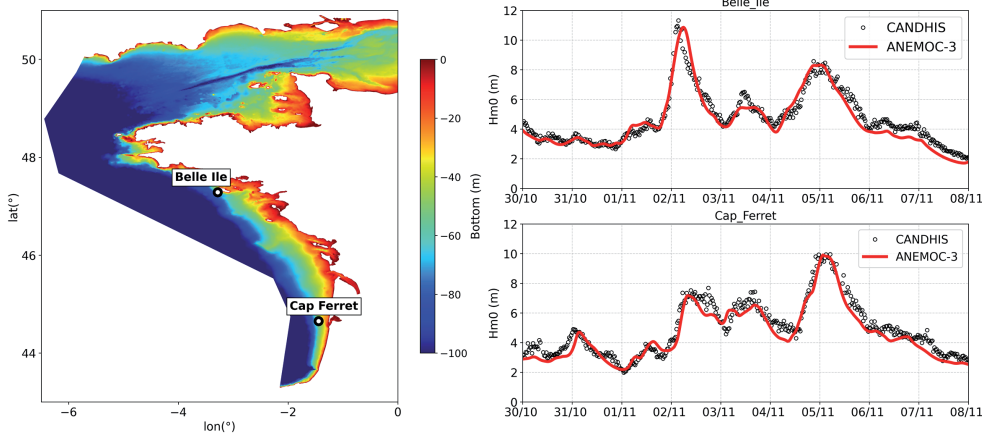
du  $xx^e$  siècle, des capteurs ponctuels ont été installés en mer : bouées houlographes, capteurs de pression posés sur le fond en zone côtière, perches à vagues sur des plateformes en mer, etc. Citons notamment le réseau français de bouées CANDHIS<sup>2</sup>, exploité par le Cerema. Depuis le milieu des années 1980, des approches de télédétection de champs de vagues aéroportée et satellitaire se sont fortement développées. De nombreux satellites (ERS, Jason, Sentinel, CFOSAT, etc.) embarquent des altimètres ou des radars à synthèse d'ouverture (SAR). Enfin, des radars, des lidars (*light detection and ranging*) et des techniques de stéréo-photographie/vidéo peuvent offrir une description fine du champ de vagues. Toutes ces informations aident à établir des statistiques de hauteurs de vagues à long terme.

## Génération et propagation de vagues au large

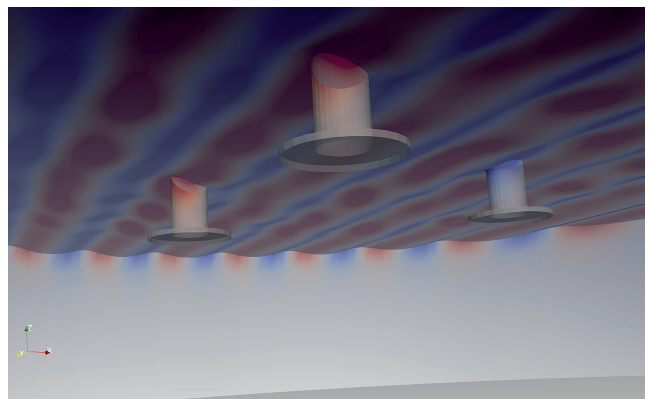
Modéliser la génération des vagues nécessite de comprendre et représenter les processus d'interaction océan-atmosphère à l'interface entre les deux milieux. Des modèles ont été développés par Harold Jeffreys en 1925, puis John W. Miles et Owen M. Phillips en 1957, pour décrire les effets de résonance entre les fluctuations de pression atmosphérique et la réponse de la surface de la mer, sous la forme d'une

1. Une vague scélébrate est une vague anormalement grande dans un état de mer – agitation à la surface de la mer due au vent – de forte intensité. Conventionnellement, il s'agit d'une vague dont la hauteur crête-à-croix  $H$  excède 2 fois la hauteur significative de l'état de mer  $H_s$ . Cette hauteur  $H_s$  est définie comme la hauteur du tiers supérieur des plus grandes vagues de l'état de mer. Un exemple typique est la vague dite du « Nouvel An », mesurée le 1<sup>er</sup> janvier 1995 sur la plateforme Draupner, en mer du Nord. Cette vague avait une hauteur  $H = 25.3$  m, au sein d'un état de mer de tempête très intense, avec  $H_s = 11,9$  m (donc  $H/H_s = 2.13$  ici). Ces vagues scélébrates peuvent provoquer des dommages importants sur les structures en mer et les navires.

2. Pour en savoir plus, voir en ligne : <https://candhis.cerema.fr/>



**Figure 1.** Comparaison des hauteurs significatives de vagues simulées à l'aide du code Tomawac dans la réanalyse de vagues ANEMOC-3 (couvrant la période 1979 à 2024). Les hauteurs sont mesurées par les bouées de la base CANDHIS situées au large de Belle-Ile-en-Mer et du Cap-Ferret durant les tempêtes Ciarán et Domingos du 30 octobre au 07 novembre 2023. Auteurs : Maria Teles et Michel Benoit.



onde qui s'amplifie progressivement. La théorie de Miles, qui prédit une croissance exponentielle des ondes avec le temps, constitue un modèle de base pour représenter l'apport d'énergie dû au vent.

À l'échelle des océans, l'approche de modélisation numérique la plus adaptée repose sur un bilan d'énergie du champ de vagues, qui prend en compte la propagation des vagues à travers l'océan, les apports d'énergie dus au vent, la dissipation due au moutonnement des crêtes de vagues<sup>3</sup>, et les interactions non linéaires à 4 ondes.

Ces différents travaux ont abouti aux modèles dits de 3<sup>e</sup> génération, avec le code phare WAM en 1988<sup>4</sup>. Depuis, d'autres codes ont suivi (dont WAVEWATCH III, SWAN et Tomawac, distribués en *open source*), apportant des spécificités complémentaires sur les interactions des vagues avec les courants et la marée, les processus côtiers, la représentation plus fine des zones littorales avec des maillages non structurés, etc.

Ces modèles trouvent plusieurs types d'applications, de l'échelle globale à l'échelle côtière. Tout d'abord, ils servent à prévoir les vagues quelques jours à l'avance (*forecast*), lorsqu'ils sont forcés par des prévisions météorologiques de champs de vent. Ensuite, ils permettent la reconstitution de séries longues de vagues sur une zone donnée (rejeu ou *hindcast*), en forçant le modèle par des champs de vent issus de réanalyses atmosphériques sur plusieurs décennies (voir fig. 1, extraite de la base ANEMOC-3). Enfin, ils permettent des études prospectives d'effets dus au dérèglement climatique, en exploitant les sorties de modèles climatiques globaux pour des scénarios du climat futur.

## Propagation de vagues du large jusqu'à la côte

Près de la côte, où la profondeur devient inférieure à la longueur d'onde, la bathymétrie<sup>5</sup> et les courants influencent la direction, la hauteur et la célérité des vagues par réfraction, ainsi que leur atténuation. À cette échelle (fig. 2), le vent joue un rôle moindre. De plus, la présence

**Figure 2.** Une vue satellitaire (à gauche) de la propagation des ondes vers la côte et une simulation numérique (à droite) illustrant l'échelle typique entre la longueur d'onde et une éolienne *offshore* (vue du flotteur sous la surface de l'eau). Source : Contient des données modifiées de Copernicus Sentinel-2, 2024 (gauche) ; Auteurs : Emmanuel Dombre, Jeffrey Harris, Michel Benoit (droite).

3. Soit quand elles écumant.

4. Les modèles de 3<sup>e</sup> génération modélisent l'évolution, en espace et en temps, de la densité spectrale d'énergie des vagues, plus communément appelée « spectre de vague ».

5. La bathymétrie est le terme utilisé pour désigner le relief sous-marin.

d'îles, de caps ou d'ouvrages (digues, jetées) entraîne des effets de diffraction et de réflexion.

Dans ce régime, des modèles à phases résolues sont souvent utilisés, car l'échelle spatiale d'intérêt (par exemple, un port, un bateau ou une éolienne *offshore*) est comparable à la longueur d'onde. Historiquement, les bases ont été établies au XIX<sup>e</sup> siècle, avec les premiers travaux de George B. Airy (1841) et George G. Stokes (1847). Par la suite, John Scott Russell a observé expérimentalement la propagation d'une onde solitaire se déplaçant sans déformation dans un canal de section rectangulaire. Joseph Boussinesq (1871) a ensuite proposé une équation fondée sur un développement limité, expliquant l'existence de cette onde solitaire et posant les bases de modèles plus avancés. Dans leur forme actuelle, les premiers résultats numériques remontent aux années 1970, principalement pour l'étude de la propagation des vagues en zone portuaire (Peregrine, 1967 ; Brocchini, 2013). Les limitations concernant la hauteur de vagues et la gamme de longueurs d'onde ont progressivement été levées grâce à des équations de plus en plus complexes, comme les équations de Boussinesq d'ordre élevé ou les équations de Serre-Green-Naghdi (SGN) (Serre, 1953). Une autre approche consiste à résoudre numériquement les équations d'Euler pour un fluide avec conditions non linéaires de surface libre, ou leur variante en formulation potentielle si l'hypothèse d'écoulement irrotationnel<sup>6</sup> peut être acceptée. Avec ces modèles aux équations primitives, les effets non linéaires et dispersifs peuvent être pris en compte, sans limitation de profondeur d'eau relative et jusqu'à la limite de stabilité des vagues avant déferlement.

Ce processus de déferlement des vagues reste encore imparfaitement maîtrisé de nos jours. Même si ce phénomène est facilement observable sur une plage, il n'existe pas de définition universelle du déferlement. Il est généralement caractérisé par le retournement de la surface, une aération de l'écoulement et une dissipation d'énergie associée à un niveau de turbulence élevé. Pour une houle périodique en mer, le critère d'apparition du déferlement a été bien décrit par Robert Miche (1944) dans les *Annales des Ponts et Chaussées*<sup>7</sup>, avec des variantes optimisées ultérieures. Cependant, une explication complète couvrant tous les cas – vagues irrégulières, bathymétrie variable, etc. –, n'est pas encore établie à date. Ce défi vient du fait

que la physique des vagues est souvent simplifiée pour établir des équations de propagation. Cependant, les hypothèses de ces modèles ne sont pas toujours compatibles avec le phénomène de déferlement. Il existe différents types de déferlement des vagues (glissant, plongeant, frontal), suivant la cambrure des vagues et la pente locale des fonds marins.

L'intelligence artificielle (IA) est de plus en plus utilisée pour traiter des équations complexes liées à la propagation et au déferlement des vagues, offrant parfois des solutions bien plus rapides que les modèles classiques, souvent limités par la complexité physique et les capacités de calcul. Toutefois, la plupart des modèles d'IA fonctionnent comme des boîtes noires, sans contrainte physique explicite. Une alternative, les *Physics-Informed Neural Networks* (PINNs), intègre ces contraintes et se situe entre les approches purement numériques et les modèles IA fondés uniquement sur les données. Cependant, si un PINN n'est pas toujours plus efficace qu'un modèle classique bien optimisé, l'IA peut parfois donner des résultats remarquables pour des problèmes comportant un grand nombre de paramètres. Un défi majeur reste de déterminer la meilleure approche selon l'application.

## Applications et problématiques de recherche

Une estimation précise de conditions de vagues est nécessaire pour diverses applications, incluant le transport maritime, le dimensionnement de structures en mer, l'évaluation des risques côtiers d'érosion et de submersion, l'exploitation des énergies marines, le tourisme et les sports de loisir, tel que la voile ou le surf (voir par exemple, la prédiction de la hauteur de vagues pendant les Jeux olympiques de Paris 2024 à Teahupo'o à Tahiti), qui ont tous des impacts naturels et/ou socio-économiques importants. Les politiques publiques et les gestionnaires des ports, du transport maritime, du littoral et des infrastructures côtières ont besoin d'une bonne connaissance des conditions de vagues pour des besoins opérationnels et pour des prédictions. Ces informations serviront à dimensionner des structures, planifier des opérations en mer ou adapter la gestion du littoral, et éventuellement, les plans d'urbanisme. À l'heure actuelle, il existe un fort besoin de mieux comprendre les processus physiques

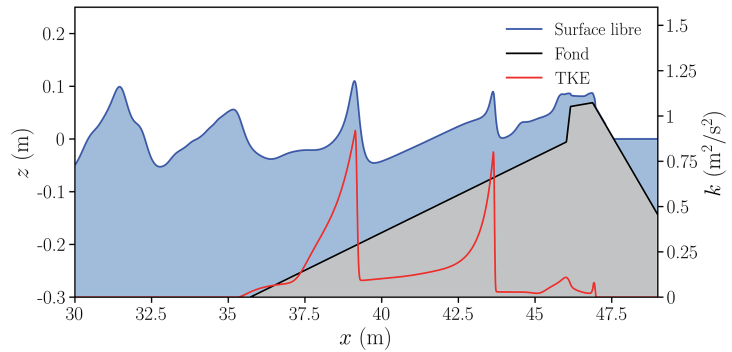
6. Un écoulement est dit irrotationnel lorsque la rotation des particules de fluide est nulle au cours de leur mouvement.

7. Parmi les anciens élèves et/ou professeurs de l'École nationale des ponts et chaussées, beaucoup ont joué un rôle majeur dans le développement de l'hydrodynamique, essentiellement au XIX<sup>e</sup> siècle. Pour ce qui concerne la théorie des vagues, on doit mentionner M. Miche et F. Serre.

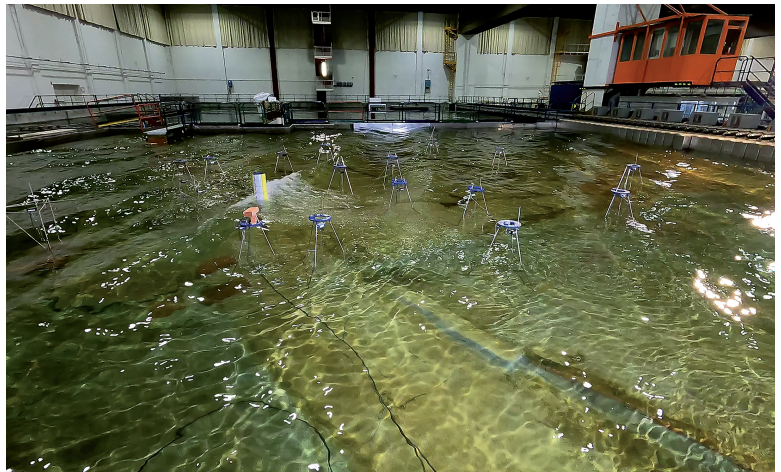
de génération, propagation et dissipation des vagues, et de mieux les représenter dans des simulations numériques à des échelles de temps courtes (comme les tempêtes) et longues (à l'instar du dérèglement climatique). Afin d'isoler des phénomènes qui sont souvent difficiles à mesurer en mer, des études sont aussi réalisées en laboratoire, et toutes les observations sont utilisées pour calibrer et valider des modèles numériques. À titre d'illustration, nous présentons deux cas spécifiques de recherche avec des enjeux sociétaux importants, qui représentent le cœur des études récentes menées au Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (LHSV) : l'évaluation des risques de submersion et franchissement, et les contributions au dimensionnement de structures en mer<sup>8</sup>.

### Évaluation des risques de submersion par franchissement

Dans le but d'anticiper le risque de submersions marines de zones côtières, des recherches combinant des modélisations expérimentales à échelle réduite en bassin à vagues et des simulations numériques sont menées au LHSV. Ces études complètent les connaissances existantes des guides de référence (EurOtop, 2018). Des formules semi-empiriques, établies à partir d'essais en laboratoire, couvrent des conditions courantes, avec des géométries d'ouvrage simples, et une bathymétrie d'avant-côte idéalisée. Dans les cas réels, pour des géométries d'ouvrages particulières, des états de mer complexes ou une bathymétrie irrégulière, des essais en laboratoire et/ou des simulations numériques sont requis. Par exemple, une thèse récente menée au LHSV et au Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF R&D a étudié l'influence d'états de mer complexes sur le processus de franchissement dans le canal soufflerie de l'Institut Pythéas à Marseille (Villefer *et al.*, 2024). Un autre volet couvre la simulation numérique intégrée de la transformation des vagues depuis le large jusqu'au pied de l'ouvrage, incluant le déferlement, de l'ascension des vagues sur l'ouvrage (*run-up*) et du franchissement. Pour cela, un modèle de vagues fondé sur les équations SGN (*cf.* partie 3) est développé et fait l'objet de validations intensives par rapport à des essais (fig. 3). Ce modèle reproduit les débits moyens de franchissement avec précision et peut être utilisé pour prédire les risques de franchissement pour différentes conditions de niveau marin et de vagues. En perspective, cet outil pourrait



**Figure 3.** Simulation numérique du franchissement par les vagues d'une digue de protection côtière de pente 1:2.  
Auteur : Guillaume Coulaud, thèse en cours.



**Figure 4.** Projet 3DWaveBI dans le bassin à vagues à EDF Lab Chatou. Il illustre la mesure de la propagation et du déferlement de vagues sur un fond 3D, dont la forme s'inspire des dunes sous-marines observées en mer ; ainsi que leurs impacts sur une monopile lors des essais expérimentaux.  
Photographie : Marissa Yates.

permettre de mieux anticiper les effets du dérèglement climatique sur la vulnérabilité des côtes à l'aléa inondation.

### Contributions au dimensionnement de structures en mer

Une bonne connaissance des conditions de vagues est nécessaire pour concevoir des structures en mer (les éoliennes incluses) capables de résister d'une part aux sollicitations cycliques répétées des vagues au cours de la durée de vie de la structure (fatigue) et d'autre part aux vagues extrêmes pendant des impacts de vagues déferlantes. Dans le cadre du projet 3DWaveBI (3D Wave Breaking Impacts), plus de 100 essais ont été réalisés dans un bassin 3D de vagues, dans les halls expérimentaux à EDF Lab Chatou. L'objectif était d'étudier la transformation et le déferlement de vagues, mais aussi d'évaluer l'impact des vagues sur une structure représentative d'une monopile d'éolienne (fig. 4). Lors des essais, différentes mesures ont été prises pour identifier les zones de déferlement par l'écume générée, évaluer le type de

**8.** Voir aussi l'article « Vent ouvert en mer : les parcs éoliens offshore » dans ce numéro, p. 118.

déferlement impactant la monopile, mesurer les caractéristiques des vagues et les efforts de vagues non linéaires sur la monopile. Cette étude vise à améliorer l'estimation des effets d'un fond variable 3D sur les conditions de vagues et de déferlement, pour la planification des parcs éoliens en mer et pour le dimensionnement des éoliennes.

### Perspectives

De leur génération jusqu'à leur dissipation, les vagues en mer font l'objet d'une longue histoire d'études analytiques, d'observations, de théorie et de simulations numériques. Les avancées depuis plus d'un siècle permettent, à l'heure actuelle, de produire des estimations de conditions de vagues couvrant différentes échelles spatio-temporelles. Les observations ponctuelles avec des bouées en mer sont complétées depuis plusieurs décennies par des observations par télédétection permettant d'étendre la couverture spatiale aux échelles des bassins océaniques.

En parallèle, le développement de modèles a progressé de façon continue, depuis les modèles analytiques proposés au XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'aux modèles numériques de nos jours, allant de l'échelle d'une vague à celle des océans. Des modèles d'états de mer sont capables d'estimer les conditions de vagues à l'échelle des bassins océaniques et le long des côtes. Des modèles à phases résolues permettent aussi de viser des échelles locales, avec une meilleure résolution spatio-temporelle pour de nombreuses applications, allant de la prévision à l'évaluation des risques associés de submersion et d'érosion des plages, en passant par le dimensionnement des structures en mer.

Aujourd'hui, les enjeux de recherche couvrent de nombreux sujets, incluant des nouvelles approches de mesures, l'amélioration de la compréhension et la modélisation des processus physiques dans les modèles d'états de mer tout comme les modèles à phases résolues, incluant de nouvelles techniques émergentes de modélisation avec de l'IA.

## Bibliographie

Airy George Biddell, 1845. *Tides and waves*, Londres, B. Fellowes.

Boussinesq Joseph, 1871. « Théorie de l'intumescence liquide appelée onde solitaire ou de translation se propageant dans un canal rectangulaire », *Les comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Institut de France*, vol. 72, p. 755-759.

Brocchini Maurizio, 2013. « A reasoned overview on Boussinesq-type models: the interplay between physics, mathematics and numerics », *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 469, n°2160. <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0496>

Coulaud Guillaume. « Numerical simulation of nearshore wave propagation and overtopping of coastal protections with weakly dispersive phase-resolving models », thèse de doctorat

en Mécanique des fluides sous la direction de Michel Benoit, Marne-la-Vallée/ENPC (en cours).

EurOtop, Van der Meer J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce *et al.*, 2018 (2<sup>e</sup> éd.). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. EurOtop. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)

Miche Robert, 1944. « Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante », *Annales de Ponts et Chaussées*, vol. 1, p. 26-78 ; vol. 2, p. 270-292 ; vol. 3, p. 369-406.

Peregrine D. Howell, 1967. « Long waves on a beach », *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 27, n°4, p. 815-827. <https://doi.org/10.1017/S0022112067002605>

Serre François, 1953. « Contribution à l'étude des écoulements permanents et variables dans les canaux », *La Houille Blanche*, vol. 39, n°6, p. 830-872. <https://doi.org/10.1051/LHB/1953058>

Stokes George Gabriel, 1847. « On the theory of oscillatory waves », *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 8, p. 441-455.

Villefer Antoine, Michel Benoit, Damien Violeau *et al.*, 2024. « Étude expérimentale de submersion de protections côtières pour des états de mer combinant houle et clapot », *Revue Paralia*, vol. 14. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2024.s02>